



TUGAS AKHIR - TF 141581

PERANCANGAN SISTEM KENDALI *LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN* PADA *OFFSHORE PLATFORM* TIPE *STEEL JACKET* UNTUK MENJAGA KESTABILAN *PLATFORM*

ALFIAN HARIDA MAULANA
NRP. 02311440000087

Dosen Pembimbing :
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TF 141581

**DESIGN LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN
CONTROL SYSTEM ON OFFSHORE PLATFORM
TYPE STEEL JACKET TO KEEP PLATFORM
STABILITY**

ALFIAN HARIDA MAULANA
NRP. 02311440000087

Supervisors :
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Alfian Harida Maulana
NRP : 2413100064
Jurusan/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Perancangan Sistem Kendali *Linear Quadratic Gaussian* Pada *Offshore Platform* Tipe *Steel Jacket* Untuk Menjaga Kestabilan *Platform*" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 13 Juli 2018
Yang membuat pernyataan,



Alfian Harida Maulana
NRP. 02311440000087

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

PERANCANGAN SISTEM KENDALI *LINEAR* *QUADRATIC GAUSSIAN* PADA *OFFSHORE PLATFORM* TIPE *STEEL JACKET* UNTUK MENJAGA KESTABILAN *PLATFORM*

Oleh:

Alfian Harida Maulana
NRP. 02311440000087

Surabaya, 23 Juli 2018

Menyetujui,
Dosen Pembimbing I

Menyetujui,
Dosen Pembimbing II

Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. Prof. Ir. Eko B. Djatmiko, M. Sc., Ph.D.
NIPN. 19660116 198903 2 001 NIPN. 19581226 198403 1 002

Mengetahui,
Ketua Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si, Ph.D.
NIPN. 19780902 200312 1 002

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN II
PERANCANGAN SISTEM KENDALI *LINEAR*
QUADRATIC GAUSSIAN* PADA *OFFSHORE PLATFORM
***TIPE STEEL JACKET* UNTUK MENJAGA KESTABILAN**
PLATFORM

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ALFIAN HARIDA MAULANA
NRP. 02311440000087

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. (Pembimbing I)
2. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing II)
3. Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA. (Ketua Penguji)
4. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc. (Penguji I)
5. Dr. rer. nat. Ir. Aulia M. T. Nasution, M.Sc. (Penguji II)

SURABAYA
JULI, 2018

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI *LINEAR*
QUADRATIC GAUSSIAN PADA *OFFSHORE PLATFORM*
TIPE *STEEL JACKET* UNTUK MENJAGA KESTABILAN
*PLATFORM***

Nama : Alfian Harida Maulana
NRP : 02311440000087
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : 1.Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
2.Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc.,
Ph.D.

Abstrak

Offshore platform tipe steel jacket merupakan bangunan lepas pantai untuk proses eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas bumi. Parameter platform yang digunakan adalah panjang, kedalaman, massa, ratio redaman, dan frekuensi natural. Kestabilan *platform* sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti gangguan gelombang laut, arus laut, dan angin yang dapat menurunkan kestabilan dari *platform*. Pengendalian kestabilan platform dapat dilakukan dengan beberapa metode kendali. Sistem kendali *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) merupakan metode yang diterapkan pada *platform* untuk mengendalikan kestabilannya. Parameter LQG yang dipilih adalah parameter yang menyebabkan fungsi kriteria mempunyai nilai minimum. Pengujian sistem dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Matlab pada komputer. Terdapat 5 tahap uji yaitu uji kestabilan, uji keterkendalian, uji keteramatan, uji *open loop*, dan uji *close loop*. Pengujian *close loop* dilakukan dengan gangguan gelombang laut sea state 1 sampai 6 menghasilkan nilai maksimum overshoot berturut-turut sebesar 0,453; 0,822; 2,320; 3,418; 4,258; 5,029 dan nilai eror berturut-turut sebesar 0,383; 0,663; 1,535; 1,914; 2,421; 2,965.

Kata Kunci : Kestabilan, keterkendalian dan keteramatan, *Linear Quadratic Gaussian* (LQG), *platform steel jacket*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

**DESIGN LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN CONTROL
SYSTEM ON OFFSHORE PLATFORM TYPE STEEL
JACKET TO KEEP PLATFORM STABILITY**

Name : Alfian Harida Maulana
NRP : 02311440000087
Department : Engineering Physics FTI-ITS
Supervysors : 1.Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
2.Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc.,
Ph.D.

Abstract

Offshore platform steel jacket type is an offshore building for oil and gas exploration and exploitation process. The platform parameters used are length, depth, mass, damping ratio, and natural frequency. The stability of the platform is strongly influenced by environmental conditions such as ocean wave disruption, ocean currents, and winds that can degrade the stability of the platform. Platform stability control can be done with several control methods. Linear Quadratic Gaussian (LQG) control system is a method applied to the platform to control its stability. The selected LQG parameters are parameters that cause the criteria function to have a minimum value. System testing was done with the help of Matlab software on a computer. There are 5 stages of test those are stability test, controllability test, observability test, open loop test, and close loop test. Close loop test was done with sea wave disturbances sea state 1 to 6 resulting in maximum overshoot values of 0.453; 0,822; 2,320; 3,418; 4,258; 5,029 and error values respectively 0,383; 0.663; 1,535; 1,914; 2,421; 2,965.

Keywords : Controllability and observability, Linear Quadratic Gaussian (LQG), stability, steel jacket platform.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

KATA PENGANTAR

“Perancangan Sistem Kendali *Linear Quadratic Gaussian* Pada *Offshore Platform* Tipe *Steel Jacket* Untuk Menjaga Kestabilan *Platform*” merupakan penelitian tentang pengendalian *Offshore Platform* Tipe *Steel Jacket* dengan metode kendali optimal *Linear Quadratic Gaussian*. Penelitian ini dilakukan oleh penulis bersama Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T dan Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. Penelitian ini bertujuan untuk mengendalikan *offshore platform* dari gangguan gelombang laut sehingga proses eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas bumi tidak terganggu.

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir beserta Laporan Tugas Akhir yang berjudul **PERANCANGAN SISTEM KENDALI LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN PADA OFFSHORE PLATFORM TIPE STEEL JACKET UNTUK MENJAGA KESTABILAN PLATFORM.**

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian Tugas Akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS.
2. Ibu Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. dan Bapak Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Kedua orang tua penulis, Hartono dan Ida Sukirnawati atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan untuk penulis.
4. Bapak Ir. Roekmono, M.T. selaku dosen wali yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika ITS.
5. Dimas, Fika, Rara, Shiko, Fifi, sahabat kecil yang selalu memberi dukungan, doa, dan warna dalam hidup penulis.

6. Tika, Lucky, Anis, Nurul, Srestha, Hafizh, sahabat angkatan sejak maba yang selalu menemani, memberi dukungan, doa, dan warna dalam perkuliahan penulis.
7. Teman-teman bimbingan Tugas Akhir Ibu Aulia (Niken, Gama, Thoriq, Agil, Mbak Novia, Mbak Chairani dan Mbak Sarah) yang telah menjadi teman diskusi yang baik selama satu semester terakhir dan segala dukungan yang kalian berikan.
8. Iqball dan Fahmi teman begadang yang selalu menemani penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini.
9. Seluruh dosen, karyawan, dan civitas akademik Teknik Fisika FTI-ITS atas segala bantuan dan kerjasamanya
10. Seluruh pihak yang telah membantu dan mendukung penyelesaian penelitian ini dan tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa mungkin masih ada kekurangan dalam laporan ini, sehingga kritik dan saran penulis terima. Semoga laporan ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis dan pihak yang membacanya.

Surabaya, 23 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
<i>TITLE PAGE</i>	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN II	v
Abstrak	vii
<i>Abstract</i>	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR NOTASI	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Sistematika Laporan.....	3
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1 <i>Offshore Platform</i>	5
2.2 Model Dinamika <i>Platformm</i>	7
2.3 Model Dinamika Gangguan	10
2.4 Kontrol Optimal	12
2.5 <i>Linear Quadratic Gaussian</i> (LQG).....	13
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Identifikasi Masalah	22
3.2 Studi Literatur	22
3.3 Pengambilan Data Platform	22
3.4 Pemodelan Dinamika <i>Platform</i>	23
3.5 Pemodelan Dinamika Gangguan.....	27
3.6 Analisis Keterkendalian dan Keteramatan <i>Model State Space</i> dari <i>Plant</i>	29
3.7 Perancangan Sistem Kendali <i>Linear Quadratic Gaussian</i>	32
3.8 Simulasi dan Pengujian Sistem Kendali Linear Quadratic Gaussian (LQG)	40

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	47
4.1 Hasil Uji Kestabilan Sistem	47
4.2 Analisa Respon Open Loop Sistem.....	47
4.3 Analisa Respon Uji <i>Close-Loop</i> Sistem Tanpa Gangguan	48
4.4 Analisa Respon Uji <i>Close-Loop</i> Sistem dengan Gangguan Sea State 1	49
4.5 Analisa Respon Uji <i>Close-Loop</i> Sistem dengan Gangguan Sea State 2.....	50
4.6 Analisa Respon Uji <i>Close-Loop</i> Sistem dengan Gangguan Sea State 3.....	51
4.7 Analisa Respon Uji <i>Close-Loop</i> Sistem dengan Gangguan Sea State 4.....	52
4.8 Analisa Respon Uji <i>Close-Loop</i> Sistem dengan Gangguan Sea State 5.....	53
4.9 Analisa Respon Uji <i>Close-Loop</i> Sistem dengan Gangguan Sea State 6.....	54
4.10 Analisa Respon Uji <i>Close-Loop</i> Sistem dengan Gangguan Gaussian.....	55
4.11 Pembahasan.....	56
BAB V PENUTUP	59
5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA.....	61
LAMPIRAN	63
BIODATA PENULIS.....	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Jenis <i>offshore platform</i> (Reddy & Swamidas, 2014).....	5
Gambar 2. 2 Beberapa tipe <i>offshore fixed platform</i> (Sadeghi, 2017).....	7
Gambar 2. 3 <i>Offshore platform tipe steel jacket</i> ideal dengan <i>active mass damper</i> (Zhang, Liu, Ma, & Tang, 2014).....	8
Gambar 2. 4 Blok Diagram Kontrol Optimal (Ogata K. , 2002)	12
Gambar 2. 5 Diagram Blok Sistem LQG (Lewis, Vrabie, & Syrmos, 2012)	16
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	21
Gambar 3. 2 Diagram blok sistem pengendalian.....	32
Gambar 3. 3 Diagram alir perancangan sistem kendali LQG.....	33
Gambar 3. 4 Diagram blok sistem kendali LQG (Lewis, Vrabie, & Syrmos, 2012)	34
Gambar 3. 5 Model simulasi open loop sistem	41
Gambar 3. 6 Model simulasi close loop sistem tanpa gangguan.....	42
Gambar 3. 7 Model simulasi close loop sistem dengan gangguan.....	44
Gambar 3. 8 Model simulasi close loop sistem dengan gangguan gaussian	46
Gambar 4. 1 Respon Uji Open Loop Sistem	47
Gambar 4. 2 Respon Uji Close Loop Sistem tanpa gangguan.....	48
Gambar 4. 3 Respon Uji <i>Close Loop</i> Sistem dengan gangguan <i>sea state 1</i>	49
Gambar 4. 4 Respon uji <i>close loop</i> sistem dengan gangguan <i>sea state 2</i>	50
Gambar 4. 5 Respon Uji <i>Close Loop</i> Sistem dengan gangguan <i>sea state 3</i>	51
Gambar 4. 6 Respon Uji Close Loop Sistem dengan gangguan <i>sea state 4</i>	52

Gambar 4. 7 Respon Uji <i>Close Loop</i> Sistem dengan gangguan <i>sea state</i> 5	53
Gambar 4. 8 Respon Uji <i>Close Loop</i> Sistem dengan gangguan <i>sea state</i> 6	54
Gambar 4. 9 Respon Uji <i>Close Loop</i> Sistem dengan gangguan gaussian	55
Gambar 4. 10 Respon sistem dengan gangguan <i>sea state</i> 1 sampai 6	56

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Deskripsi Laut (Fossen T. I., 2011).....	10
Tabel 2. 2 Algoritma perancangan gain regulator (Lewis F. L., 1986)	17
Tabel 2. 3 Algoritma perancangan gain filter kalman (Lewis F. L., 1986)	18
Tabel 3. 1 Nilai ω_0 untuk setiap sea state.	28
Tabel 3. 2 Nilai $K\omega$ untuk setiap sea state	28
Tabel 3. 3 Nilai indeks Performansi Regulator	35
Tabel 3. 4 Nilai Indeks Performansi Filter Kalman	37
Tabel 4. 1 Data hasil simulasi	57

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR NOTASI

F	= gaya (N)
m	= massa (Kg)
\ddot{z}	= percepatan sistem (m/s^2)
\dot{z}	= kecepatan sistem (m/s)
z	= perpindahan sistem (m)
k	= koefisien pegas
c	= koefisien redaman
u	= gaya kontrol aktif (N)
ω	= frekuensi natural (rps)
ξ	= rasio redaman
$S(\omega)$	= fungsi kecepatan spectral (m^2/s)
H_s	= ketinggian gelombang signifikan (m)
σ_ω	= intensitas gelombang
K_ω	= konstanta fungsi transfer gangguan gelombang
J	= indeks performansi
T	= waktu
Q	= matriks pembobotan keadaan
R	= matriks pembobotan kendali
K	= gain regulator
Q_n	= matriks gangguan noise covariance
R_n	= matriks pengukuran noise covariance
K_f	= gain filter kalman
M_c	= matriks keterkendalian
M_o	= matriks keteramatan

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas bumi dapat digunakan dengan dua cara yaitu *onshore* dan *offshore*. *Onshore* merupakan proses eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas bumi yang dilakukan di daratan sedangkan *offshore* merupakan proses eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas bumi yang dilakukan di perairan lepas pantai. Indonesia memiliki beberapa *offshore platform* seperti blok Mahakam di lepas pantai kabupaten Kutai Kertanegara, provinsi Kalimantan Timur, blok *Offshore North West Java* (ONWJ) di lepas pantai kabupaten Bekasi, Karawang, Subang, dan Indramayu, provinsi Jawa Barat, blok South East Sumatra di laut jawa, sebelah utara teluk Jakarta, dan blok South Natuna Sea 'B' di perairan Natuna Barat, provinsi Kepulauan Riau (Agustinus, 2016). *Offshore platform* berfungsi untuk mempermudah proses eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas bumi yang terletak di perairan lepas pantai. Proses *offshore* dibedakan berdasarkan kedalaman laut dan struktur bangunnya.

Terdapat dua jenis struktur bangunan *offshore platform* yaitu terpancang dan terapung. Kedua bangunan tersebut dibedakan berdasarkan kedalaman laut tempat *platform offshore* dioperasikan. *Offshore platform* dengan struktur terpancang dioperasikan di kedalaman 500 ft seperti, *steel jacket (fixed platform)*, *drilling barges*, dan *jackup platform*. Sedangkan *Offshore platform* dengan struktur terapung dioperasikan di kedalaman minimal 1.000 ft seperti, *drilships* dan *semi-submersible platform* (Sadeghi, 2017). Dalam proses pengoperasian *steel jacket platform* terdapat gangguan-gangguan lingkungan seperti gelombang laut, arus laut, dan angin. Gangguan-gangguan tersebut dapat menurunkan kestabilan dari *platform*. Hal tersebut berpengaruh pada proses eksplorasi dan eksploitasi minyak bumi dan gas alam.

Dari permasalahan tersebut dibutuhkan suatu sistem kendali yang dapat memberikan gaya-gaya untuk menjaga kestabilan *platform* dari gangguan-gangguan lingkungan. Sehingga proses eksplorasi dan eksploitasi minyak bumi dan gas alam dapat

berjalan sesuai dengan keinginan. Sistem kendali *offshore platform* tipe *steel jacket* telah berhasil dirancang pada beberapa penelitian sebelumnya diantaranya dengan menggunakan sistem kendali *sliding mode H_∞ control* (Zhang, Ma, & Han, Sliding Mode H_∞ Control for Offshore Steel Jacket Platforms Subject to Nonlinear Self-Excited Wave Force and External Disturbance, 2012), *discrete feedforward* dan *feedback optimal tracking control* (Zhang, Liu, Ma, & Tang, 2014), *observer-based optimal fault-tolerant control* (Zhang, Feng, & Li, 2014) dan *fuzzy H_∞ control* (Xu, Zhang, Cun, & Xie, 2016). Pada penelitian tugas akhir ini dilakukan perancangan sistem kendali *linear quadratic gaussian* pada *offshore platform* tipe *steel jacket* untuk menjaga kestabilan *platform*.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan penelitian yang diangkat dalam pengerjaan tugas akhir ini antara lain.

1. Bagaimana mendesain sistem kendali pada *offshore platform* tipe *steel jacket* dengan metode *linear quadratic gaussian*?
2. Berapa batas toleransi frekuensi gangguan agar sistem tetap stabil?

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian yang ingin dicapai dalam pengerjaan tugas akhir ini antara lain.

1. Bagaimana mendesain sistem kendali pada *offshore platform* tipe *steel jacket* dengan metode *linear quadratic gaussian*?
2. Berapa batas toleransi frekuensi gangguan agar sistem tetap stabil?

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Menggunakan obyek penelitian *platform* tipe *steel jacket*.
2. Pemodelan dinamika sistem menggunakan pendekatan pegas massa.

3. Aktuator yang digunakan adalah *active mass damper* (AMD).
4. Gangguan yang digunakan adalah gangguan gelombang laut dari *sea state* 1 hingga 6.
5. Penelitian dilakukan secara simulasi menggunakan bantuan *software* MatLab R2014.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Bab ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika laporan.

BAB II Dasar Teori

Bab ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti *offshore platform*, model dinamika *offshore platform* tipe *steel jacket*, sistem kendali optimal *Linear Quadratic Gaussian*

BAB III Metodologi Penelitian

Bab ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode, dan langkah-langkah dalam penelitian.

BAB IV Hasil dan Pembahasan

Bab ini berisi tentang data hasil penelitian dari simulasi sistem kendali lintasan kapal menggunakan kendali optimal *Linear Quadratic Gaussian* dan analisis dari respon sistem.

BAB V Penutup

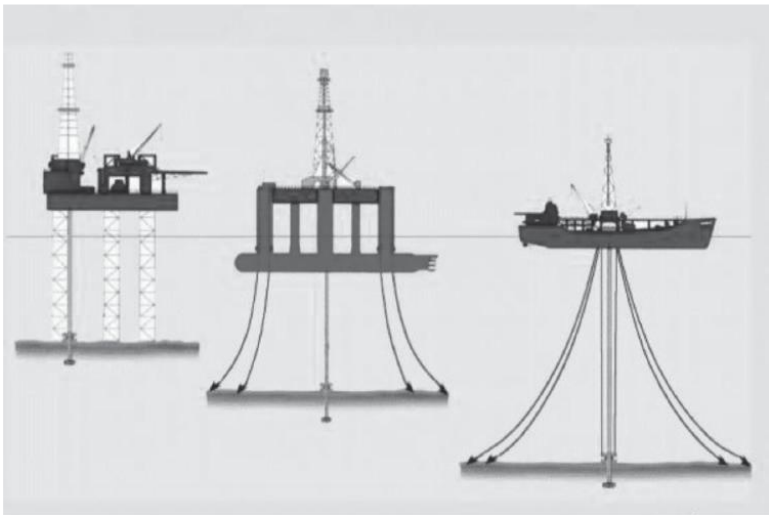
Bab ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan data-data yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir selanjutnya.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB II DASAR TEORI

2.1 *Offshore Platform*

Offshore platform merupakan bangunan lepas pantai yang terbuat dari struktur baja, beton bertulang, atau kombinasi keduanya. *Offshore platform* digunakan untuk proses eksplorasi dan ekstraksi minyak dan gas bumi. Struktur ini dirancang untuk instalasi di perairan seperti, laut, danau, sungai, dan lain sebagainya. *Offshore platform* umumnya terbuat dari berbagai jenis baja mulai dari baja ringan hingga baja berkekuatan tinggi, meskipun beberapa *platform* berumur tua terbuat dari beton bertulang. *Offshore platform* mempunyai berbagai jenis struktur yang dibedakan berdasarkan kedalaman perairan tempat *platform* tersebut beroperasi. Terdapat dua jenis *offshore platform* yaitu *platform* yang dapat dipindahkan dan *platform* yang tidak dapat dipindahkan.



Gambar 2. 1 Jenis *offshore platform* (Reddy & Swamidas, 2014)

2.1.1 Platform yang Dapat Dipindahkan (*Movable Platform*)

Platform jenis ini merupakan *platform* yang dapat dipindah dari satu tempat ke tempat lainnya. Terdapat beberapa jenis *platform* yang dapat dipindahkan yaitu sebagai berikut. (Sadeghi, 2017)

2.1.1.1 *Drilling Barges*

Drilling barges merupakan *platform* yang sebgayaan besar digunakan untuk pengeboran di pedalaman dan perairan dangkal. *Platform* jenis ini biasanya dioperasikan di danau, rawa, sungai, dan kanal. *Drilling barges* dipindahkan dari satu tempat ke tempat lain dengan menggunakan kapal. *Platform* ini tidak mampu menahan pergerakan air seperti di laut lepas.

2.1.1.2 *Jackup Platform*

Jackup platform merupakan *platform* yang mirip dengan *drilling barges* namun memiliki satu perbedaan yaitu setelah *platform* di pindahkan di satu tempat, tiga atau empat kaki diturunkan sampai dasar laut. Kaki dari *platform* ini berfungsi untuk menjaga kestabilan *platform*. *Platform* jenis ini hanya dapat dioperasikan hingga kedalam 500 kaki.

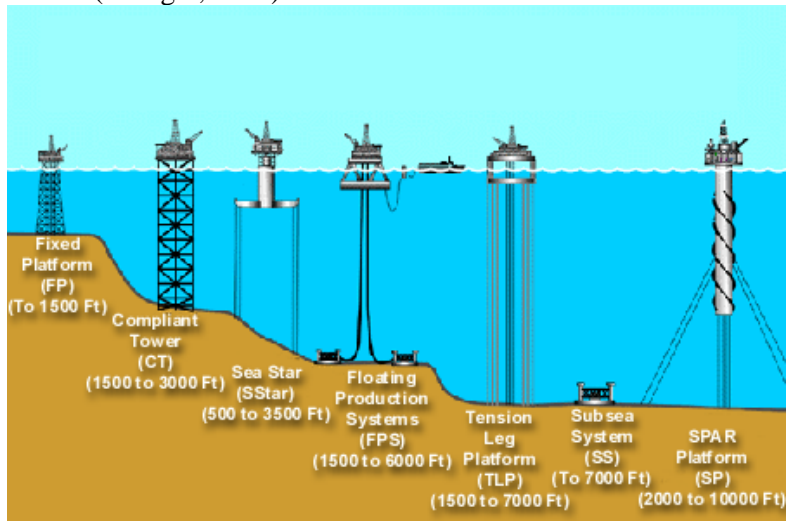
2.1.1.3 *Submersible Platform*

Submersible platform merupakan *platform* yang cocok untuk perairan dangkal. *Platform* ini memiliki dua lambung yang diposisikan di atas satu sama lain. Lambung bagian atas berisi tempat tinggal kru dan peralatan pengeboran. Sedangkan lambung bagian bawah bekerja seperti lambung luar kapal selam. Ketika *platform* ini dipindakan dari satu tempat ke tempat lain lambung bagian bawah diisi oleh udara sehingga membuat *platform* mengapung. *Platform* jenis ini memiliki keunggulan mobilitas dalam air.

2.1.2 Platform yang Tidak Dapat Dipindahkan (*Fixed Platform*)

Platform jenis ini merupakan *platform* yang tidak dapat dipindahkan atau terpancang di dasar laut. Kaki dari *platform* jenis ini terbuat dari beton atau baja yang memanjang dari bagian bawah *platform* hingga ke dasar laut. Keuntungan utama dari *platform* jenis ini adalah stabilitasnya karena melekat pada dasar laut.

Namun jenis ini tidak dapat digunakan di perairan yang sangat dalam. (Sadeghi, 2017)

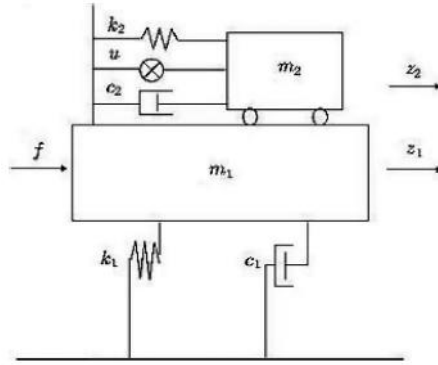


Gambar 2. 2 Beberapa tipe *offshore fixed platform* (Sadeghi, 2017)

Gambar 2.2 menunjukkan tipe *offshore fixed platform* yang terdiri dari *fixed platform*, *compliant tower*, *sea star*, *floating production system*, *tension leg platform*, *sub sea system*, dan *SPAR platform*. Jenis tersebut dibedakan berdasarkan kedalaman laut tempat *platform* beroperasi.

2.2 Model Dinamika Platform

Offshore Platform tipe *steel jacket* merupakan *offshore platform* dengan struktur terpancang yang dioperasikan di kedalaman 500 ft sampai dengan 1500 ft. Pada penelitian tugas akhir ini *offshore platform* tipe *steel jacket* menggunakan aktuator berupa *active mass damper* (AMD). *Offshore Platform* dimodelkan sebagai sebuah sistem pegas massa yang terdiri dari pegas, damper, dan massa. Model dinamika sistem ini seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.3 Offshore platform tipe steel jacket ideal dengan active mass damper (Zhang, Liu, Ma, & Tang, 2014)

Penelitian tugas akhir ini menggunakan *plant* berupa offshore platform tipe steel jacket dengan active mass damper (AMD). Pada gambar 2.1 dilakukan pemodelan dinamika dari Offshore platform tipe steel jacket dengan active mass damper (AMD). Pada offshore platform tipe steel jacket terdapat dua buah masa yaitu masa dek platform dan AMD. Pemodelan dinamik platform dilakukan dengan meninjau dua buah masa tersebut. Pertama dilakukan pemodelan dengan meninjau masa dek platform sehingga didapatkan persamaan 2.1

$$\begin{aligned}
 \Sigma F &= m_1 \ddot{z}_1(t) \\
 (c_1 + c_2) \dot{z}_1(t) - c_2 \dot{z}_2(t) + (k_1 + k_2) z_1(t) - k_2 z_2(t) + u(t) \\
 &= m_1 \ddot{z}_1(t) \\
 \ddot{z}_1(t) &= \frac{c_2}{m_1} \dot{z}_2(t) - \frac{(c_1 + c_2)}{m_1} \dot{z}_1(t) + \frac{k_2}{m_1} z_2(t) - \frac{(k_1 + k_2)}{m_1} z_1(t) - \\
 &\quad \frac{1}{m_1} u(t)
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Selanjutnya disubstitusikan nilai k dan c pada persamaan 2.2 dan 2.3

$$\begin{aligned}
 k &= m\omega^2 \\
 c &= 2\xi\sqrt{km}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

$$\begin{aligned} c &= 2\xi\sqrt{m\omega^2m} \\ c &= 2\xi m\omega \end{aligned} \quad (2.3)$$

Setelah disubstitusikan persamaan 2.2 dan 2.3 ke persamaan 2.1 didapatkan persamaan 2.4

$$\begin{aligned} \ddot{z}_1(t) &= -\left(\omega_1^2 + \frac{m_2}{m_1}\omega_2^2\right)z_1(t) + \frac{m_2}{m_1}\omega_2^2z_2(t) - \frac{1}{m_1}u(t) - \\ &2\left(\xi_1\omega_1 + \frac{m_2}{m_1}\xi_2\omega_2\right)\dot{z}_1(t) + 2\frac{m_2}{m_1}\xi_2\omega_2\dot{z}_2(t) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Kedua dilakukan pemodelan dengan meninjau masa AMD sehingga didapatkan persamaan 2.5.

$$\begin{aligned} \Sigma F &= m_2\ddot{z}_2(t) \\ c_2\dot{z}_1(t) - c_2\dot{z}_2(t) + k_2z_1(t) - k_2z_2(t) + u(t) &= m_2\ddot{z}_2(t) \\ \ddot{z}_2(t) &= \frac{c_2}{m_2}\dot{z}_1(t) - \frac{c_2}{m_2}\dot{z}_2(t) + \frac{k_2}{m_2}z_1(t) - \frac{k_2}{m_2}z_2(t) \\ &+ \frac{1}{m_2}u(t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Selanjutnya disubstitusikan persamaan 2.2 dan 2.3 sehingga didapatkan persamaan 2.6.

$$\ddot{z}_2 = \omega_2^2z_1(t) + 2\xi_2\omega_2\dot{z}_1(t) - \omega_2^2z_2(t) - 2\xi_2\omega_2\dot{z}_2(t) + \frac{1}{m_2}u(t) \quad (2.6)$$

Dengan keterangan :

z_1 = Perpindahan dek *platform*

z_2 = Perpindahan dari *active mass damper* (AMD)

m_1 = Massa dari dek *offshore platform*

ω_1 = Frekuensi dari *offshore platform*

ξ_1 = Damping rasio dari *offshore platform*

m_2 = Massa dari *active mass damper* (AMD)

ω_2 = Frekuensi dari *active mass damper* (AMD)

ξ_2 = Damping rasio dari *active mass damper* (AMD)

u = Gaya kontrol aktif

f = Gaya gelombang laut

2.3 Model Dinamika Gangguan

Gelombang merupakan pergerakan naik dan turunnya air dengan arah tegak lurus permukaan air laut yang membentuk kurva/grafik sinusoidal. Secara umum gangguan lingkungan yang mempengaruhi dinamika sebuah kapal ketika melakukan pelayaran meliputi arus, angin, dan gelombang. (Fossen T. I., 2011). Deskripsi kondisi gelombang laut berdasarkan skala presentase kemungkinan terjadinya gelombang terdapat pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Deskripsi Laut (Fossen T. I., 2011)

Persentase probabilitas					
Kode Laut	Deskripsi Laut	Gelombang (m)	Dunia	Atlantik Utara	Atlantik Selatan
0	<i>Calm (glassy)</i>	0	-	-	-
1	<i>Calm (rippled)</i>	0-0.1	11.248	8.3103	6.0616
2	<i>Smooth (wavelets)</i>	0.1-0.5	-	-	-
3	<i>Slight</i>	0.5-1.25	31.685	28.1996	21.5683
4	<i>Moderate</i>	1.25-2.5	40.194	42.0273	40.9915
5	<i>Rough</i>	2.5-4	12.8	15.4435	21.2383
6	<i>Very rough</i>	4-6	3.025	4.2938	7.0101
7	<i>High</i>	6-9	0.926	1.4968	2.6931
8	<i>Very high</i>	9-14	0.119	0.2263	0.4346
9	<i>Phenomenal</i>	Over 14	0.0009	0.0016	0.00035

Tabel 2.1 menunjukkan deskripsi ketinggian gelombang signifikan dengan prosentase probabilitas. Hubungan dari gelombang signifikan dengan kecepatan angin ditulis pada persamaan 2.7

$$H_s = 0.21 \frac{V^2}{g} \quad (2.7)$$

Frekuensi awal dari spektrum ditunjukkan pada persamaan 2.8

$$\left(\frac{dS(\omega)}{d\omega}\right)_{\omega=\omega_0} = 0 \quad (2.8)$$

Sehingga didapatkan hasil perhitungan seperti pada persamaan 2.9 dan 2.10

$$\omega_0 = \sqrt[4]{\frac{4B}{5}} \quad (2.9)$$

$$T_0 = 2\pi \sqrt[4]{\frac{5}{4B}} \quad (2.10)$$

Nilai T_0 adalah periode awal. Nilai dari B dimasukkan kedalam persamaan 2.9 sehingga didapatkan persamaan 2.11.

$$\omega_0 = 0.88 \frac{g}{V} = 0.40 \sqrt{\frac{g}{H_s}} \quad (2.11)$$

Perhitungan model gelombang digunakan untuk memperkenalkan istilah damping pada bentuk spektrum pada persamaan 2.12

$$h(s) = \frac{K_{\omega} s}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (2.12)$$

Nilai K_ω didefinisikan persamaan

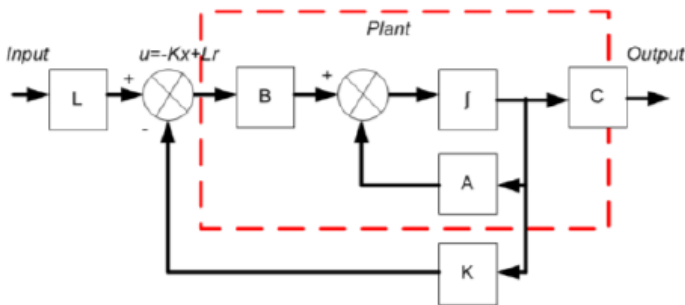
$$K_\omega = 2\xi\omega_0\sigma_\omega \quad (2.13)$$

Dengan σ_ω adalah konstanta intensitas gelombang, ξ adalah koefisien damping sedangkan ω_0 adalah frekuensi gelombang.

2.4 Kontrol Optimal

Sistem kontrol optimal adalah sistem yang mempunyai unjuk kerja terbaik (*best performance*) terhadap suatu acuan tertentu. Sistem kendali optimal memerlukan adanya suatu kriteria optimasi yang dapat meminimumkan hasil pengukuran dengan deviasi perilaku sistem terhadap perilaku idealnya (Abdullah, 2015). Dalam sistem kontrol optimal, istilah optimal seringkali merujuk pada nilai minimal, misalnya meminimalkan bahan bakar, waktu, dan kesalahan.

Blok diagram sistem kontrol optimal secara umum dapat digambarkan pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Blok Diagram Kontrol Optimal (Ogata K. , 2002)

Sistem kontrol yang baik adalah sistem kontrol yang memiliki daya tanggap yang cepat dan stabil, namun tidak memerlukan energi yang berlebihan. Sistem kontrol yang demikian dapat dicapai melalui pengaturan indeks performansi yang tepat. Sistem

kontrol yang berdasarkan optimasi indeks performansi disebut sistem kontrol optimal.

Pada suatu sistem indeks performansi dipilih sesuai dengan bagian yang akan dioptimalkan. Bentuk umum dari indeks performansi terdapat pada persamaan 2.14

$$J = \int_{t_0}^T L(x, u, t) dt \quad (2.14)$$

Keterangan:

J	= Indeks Performansi
L (x, u, t)	= Fungsi dari x, u, dan t
T	= Waktu

Salah satu metode yang biasa digunakan untuk meminimalkan indeks performansi yaitu persamaan Aljabar Ricatti yang digunakan untuk mengoptimalkan sistem proses yang berbentuk linear. Suatu sistem kontrol akan optimal pada indeks unjuk kerja yang diberikan, tetapi tidak optimal lagi pada indeks unjuk kerja yang lain. (Prasetyono, 2009)

2.5 Linear Quadratic Gaussian (LQG)

Sistem Kendali optimal *Linier Quadratic Gaussian* (LQG) adalah teknik kendali modern yang diimplementasikan dalam bentuk ruang dan waktu (*state space*) yang digunakan untuk mendesain dinamik optimal regulator. Pada perjalanan perkembangan konsep, *Linear Quadratic Regulator* (LQR) mengalami pengembangan yaitu dengan menambahkan estimator optimal (filter Kalman) yang berfungsi menyaring *noise* (derau) dalam bentuk sinyal Gaussian (noise yang dibangkitkan dari alam). Konsep pengembangan itu diperkenalkan pada tahun 1970 dengan nama *Linier Quadratic Gaussian* (LQG). Pada konsep LQG diperkenalkan konsep teori pemisahan (*separation theorem*) atau sering disebut *Certainty Equivalence Principle*.

Persamaan sistem *platform* bentuk ruang keadaan (*state space*) yang digunakan dalam sistem *optimal tracking* harus memenuhi persyaratan keterkendalian dan keteramatan (Juliana,

2014). Jika sistem tidak memenuhi syarat keterkendalian dan keteramatan maka sistem tidak dapat dikendalikan atau dikontrol. Keterkendalian merupakan jika perubahan keadaan 1 (x_1) ke keadaan selanjutnya (x_2) dapat ditentukan waktunya. Keterkendalian suatu sistem dapat dilihat dari nilai determinan matriks keterkendalian (*controllability*). Bentuk matriks keterkendalian didapatkan dengan menggunakan persamaan 2.15, jika nilai dari determinan $|M_c|$ tidak sama dengan nol, maka sistem dikatakan terkendali (Ogata K. , 2010).

$$M_c = [B \mid A*B \mid \dots \mid A^{n-1}*B] \quad (2.15)$$

Syarat kedua yaitu keteramatan sistem. Suatu sistem didefinisikan teramati, jika perubahan keadaan 1 (x_1) ke keadaan selanjutnya (x_2) dapat diamati. Keteramatan suatu sistem dapat dilihat dari nilai determinan matriks keterkendalian (*observability*). Bentuk matriks keteramatan didapatkan dengan menggunakan persamaan 2.16, jika nilai dari determinan $|M_o|$ tidak sama dengan nol, maka sistem dikatakan teramati.

$$M_o = \begin{bmatrix} C \\ C * A \\ \vdots \\ C * A^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Linear Quadratic Gaussian (LQG) merupakan metode optimal yang berasal dari gabungan dua macam metode optimal sebelumnya yaitu *Linear Quadratic Regulator* dan Kalman Filter (Supriyono, 2011). *Linear Quadratic Control* merupakan salah satu metode dalam perancangan sistem kontrol optimal. *Plant* diasumsikan bersifat sistem linier, dalam bentuk persamaan keadaan, dan fungsi obyektif adalah fungsi kuadrat dari keadaan *plant* dan sinyal *input* kendali. Permasalahan dapat dirumuskan dan dipecahkan pada kawasan frekuensi menggunakan fungsi alih. Metode optimal dengan *linear quadratic regulator* (LQR) adalah dengan menentukan sinyal masukan yang akan memindahkan suatu *state* sistem linier dari kondisi awal $x(t_0)$ menuju ke suatu

kondisi akhir $x(t)$ yang meminimumkan suatu indeks unjuk kerja performansi kuadratis (Baihaqie, Muhammad Zulizar, et all, 2014).

Filter Kalman adalah estimator optimum yang mengestimasi *state* dari suatu sistem linear yang berkembang secara dinamis terhadap fungsi waktu. Estimator optimum dapat didefinisikan sebagai suatu algoritma yang memproses seluruh data yang tersedia untuk memberikan sebuah estimasi dari “*state*” suatu sistem, sedangkan pada waktu yang sama mengestimasi beberapa kriteria pengoptimalan yang sudah diketahui sebelumnya. Sehingga dapat dikatakan bahwa kendali optimal dengan metode *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) merupakan metode kendali modern yang diterapkan dalam bentuk ruang keadaan (*state space*) yang digunakan untuk mendesain optimal *regulator*. Pada konsep metode LQG diperkenalkan konsep teori pemisahan atau sering disebut dengan *Certainy Equivalence Principle* (Rodliyah, Dinayati, et all, 2010). Model *state space* yang digunakan ditunjukkan oleh persamaan 2.17 dan 2.18.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gw \quad (2.17)$$

$$y = Cx + v \quad (2.18)$$

Keterangan :

u = Input proses

y = Output proses

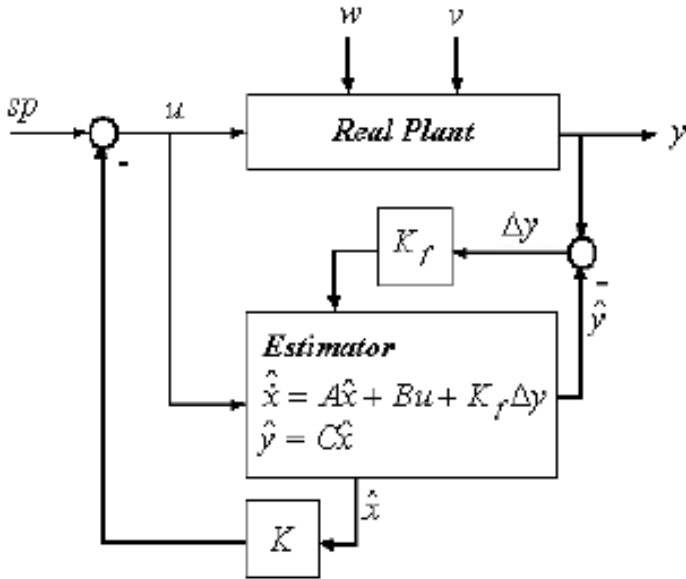
w = gangguan proses

v = gangguan pengukuran (*white noise*)

$u = -Kx + r$

K merupakan *gain* umpan balik atau disebut sebagai *regulator*, r merupakan *set point* atau masukan proses. Sehingga dapat dituliskan persamaan sistem menjadi persamaan 2.19.

$$\dot{x} = (A - BK)x + Br + Gw \quad (2.19)$$



Gambar 2. 5 Diagram Blok Sistem LQG (Lewis, Vrabie, & Syrmos, 2012)

Gambar 2.5. ditunjukkan bahwa untuk mencari sinyal kendali optimal u memerlukan suatu *gain* penguat pengendalian yaitu K (*regulator*) dan penguat *estimator* K_f (Kalman Filter) yang bernilai optimal. Berdasarkan teori pemisahan dijelaskan bahwa nilai K dan K_f dapat diperoleh secara terpisah.

2.5.1 Perancangan Gain Regulator

Sistem kendali LQG dirancang menggunakan algoritma perancangan untuk mendapatkan respon yang diinginkan. Algoritma perancangan sistem kendali LQG dibagi menjadi dua yaitu algoritma perancangan gain regulator dan filter kalman. Algoritma perancangan gain regulator terdapat pada tabel 3.3. Perhitungan dalam perancangan gain regulator menggunakan bantuan software matlab.

Tabel 2. 2 Algoritma perancangan gain regulator (Lewis F. L., 1986)

Keterangan	Persamaan
Model sistem	$\dot{x} = Ax + Bu(t)$
Indeks Performansi	$J(t_0) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^T (x^T Qx + u^T Ru) dt$ <p>Syarat : $S(T) \geq 0, Q \geq 0, R > 0$</p>
Persamaan Riccati	$-\dot{S} = A^T S + SA - SBR^{-1}B^T S + Q$
Gain Regulator	$K = R^{-1}B^T S$

Nilai K dapat diperoleh dengan metode LQR (*Linear Quadratic Regulator*) seperti persamaan 2.20

$$K = -R_c^{-1} B^T S \quad (2.20)$$

Nilai S didapatkan dari persamaan riccati pada persamaan 2.21

$$A^T S + SA - SBR_c^{-1}B^T S + Q_c = 0 \quad (2.21)$$

Nilai K_f optimal didapatkan dengan sistem bersifat stokastik yakni dengan index performansi kesalahan minimum. Indeks performansi didapatkan dari persamaan 2.22

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (x^T Q_c x + u^T R_c u) dt \quad (2.22)$$

Nilai $Q_c \geq 0, R_c > 0$, Q_c digunakan untuk menentukan matriks keadaan sedangkan R_c menentukan matriks kendali. Nilai Q_c dan R_c tergantung dengan pendesain. Nilai Q_c dan R_c dapat diperoleh dengan metode *trial and error*.

3.7.2 Perancangan Gain Estimator (Filter Kalman)

Perancangan estimator dilakukan dengan menghitung harga gain umpan balik (filter kalman) kemudian mengestimasi variabel keadaan optimal \hat{x} diperoleh dari sistem dinamik.

Algoritma perancangan gain filter kalman terdapat pada tabel 3.5. Perhitungan dalam perancangan gain filter kalman menggunakan bantuan software matlab.

Tabel 2. 3 Algoritma perancangan gain filter kalman (Lewis F. L., 1986)

Keterangan	Persamaan
Model Sistem	$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K_f(y - \hat{y})$
Indeks Performansi	$J(t_o) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^T (x^T Qx + u^T Ru)dt$
Persamaan Riccati	$0 = PA^T + AP - PC^T R_f^{-1} CP + Q_f$
Gain Filter Kalman	$K_f = PC^T R_f^{-1}$

Kalman Filter atau estimator bekerja berdasarkan sifat rekursif. Optimasi dilakukan dengan cara menekan nilai *error* sekecil mungkin. Indeks performansi atau *cost function* dapat dinyatakan dalam persamaan 2.23

$$J = E \{ [\hat{x} - x]^T [\hat{x} - x] \} \quad (2.23)$$

Nilai \hat{x} merupakan nilai estimasi dari variabel x fungsi waktu. Estimasi variabel dalam keadaan optimal \hat{x} dapat diperoleh dari persamaan dinamik Kalman Filter yang ditunjukkan oleh persamaan 2.24 dan 2.25. (Lewis, Vrabie, & Syrmos, 2012)

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \quad (2.24)$$

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly \quad (2.25)$$

Nilai penguat Kalman Filter berasal dari persamaan 2.26.

$$K_f = P C^T R_f^{-1} \quad (2.26)$$

Matriks P didapatkan dari persamaan Riccati yang ditunjukkan pada persamaan 2.27.

$$P A^T + A P - P C^T R_f^{-1} C P + Q = 0 \quad (2.27)$$

Nilai A dan B diasumsi terkendali dan C teramati dengan nilai $Q_c \geq 0$, $R_c > 0$.

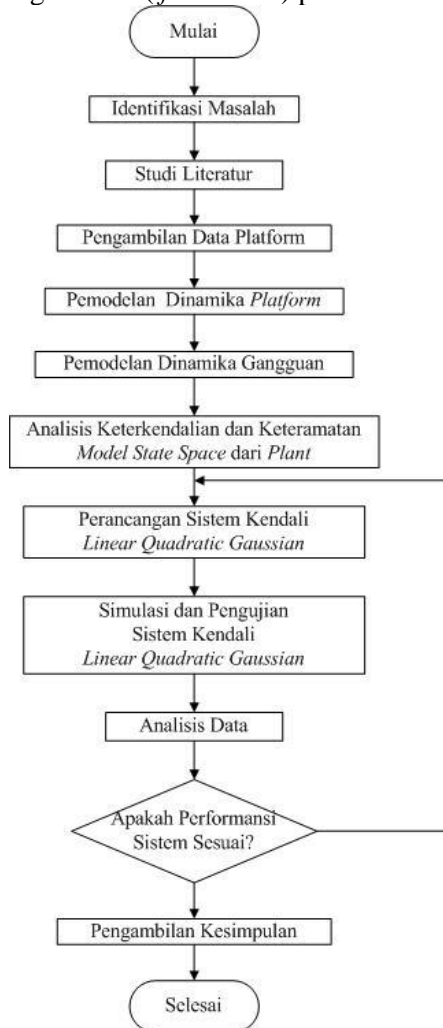
Nilai gain K dan K_f dapat ditentukan menggunakan function yang tersedia dalam MATLAB. Gain regulator K didapatkan dengan menggunakan function “lqr” yang menggunakan matriks A, B, C, dan D sebagai sistem dan nilai Q dan R yang telah ditentukan lebih dulu.

Sistem yang memiliki gangguan lingkungan seperti gangguan gelombang laut terdapat perbedaan pada penentuan nilai *gain* estimator. Nilai gain estimator ditentukan menggunakan *function* “kalman” pada MATLAB. *Function* ini dapat digunakan jika terdapat nilai *covariance* dari matriks gangguan lingkungan pada sistem.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini ditampilkan dengan sebuah diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 3.1



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.1 Identifikasi Masalah

Pada penelitian tugas akhir ini dilakukan identifikasi masalah terhadap sistem pengendalian pada *offshore platform* tipe *steel jacket* untuk menjaga kestabilan *platform* agar dapat tetap stabil ketika terkena gangguan dari lingkungan sekitar seperti gelombang laut. Pada beberapa penelitian sebelumnya telah diterapkan sistem kendali seperti *discrete feedforward*, *feedback optimal tracking control*, *fuzzy H_∞ control*, dan *sliding mode H_∞ control*. Namun performansi yang dihasilkan dari beberapa sistem kendali tersebut masih memiliki kekurangan.

3.2 Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan studi literatur untuk membangun pemahaman awal hingga detail mengenai topik tugas akhir, yakni pemodelan dinamika *offshore platform* tipe *steel jacket*, pemodelan dinamika gangguan gelombang laut, sistem kendali *linear quadratic gaussian*. Referensi yang digunakan dalam studi literature berasal dari buku, penelitian sebelumnya, dan jurnal ilmiah.

3.3 Pengambilan Data Platform

Pada tahap ini dilakukan pengambilan data offshore platform tipe steel jacket. Data parameter yang digunakan didapatkan dari jurnal ilmiah sebagai berikut (Zhang, Liu, Ma, & Tang, 2014).

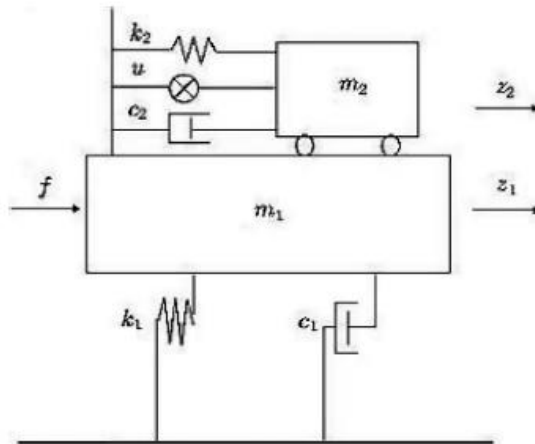
<i>Length</i>	: 249 m
<i>Depth</i>	: 218 m
<i>First mode mass (m_1)</i>	: 7.825.307 kg
<i>First mode damping ratio (ξ_1)</i>	: 0.02
<i>First mode natural frequency (ω_1)</i>	: 2,047 rps
<i>AMD mass (m_2)</i>	: 78.253 kg
<i>AMD damping ratio (ξ_2)</i>	: 0,2
<i>AMD natural frequency (ω_2)</i>	: 2,0074 rps

Pada proses eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas bumi di lepas pantai (*offshore*) memiliki batas toleransi perpindahan

platform dan percepatan *platform*. Batas perpindahan *platform* yang diijinkan adalah 10% dari kedalaman laut tempat *platform* beroperasi. Sehingga perpindahan yang diijinkan dalam *platform* ini adalah 10% dari 218m yaitu sebesar 21,8m. Sedangkan batas percepatan *platform* yang diijinkan untuk pekerja bekerja di offshore adalah $1,96\text{m/s}^2$.

3.4 Pemodelan Dinamika Platform

Pada tahap ini dilakukan pemodelan dinamika *platform* dengan tujuan untuk memrepresentasikan sistem dinamik pada *platform* yang sesungguhnya menjadi bentuk matematis sehingga dapat dilakukan analisa terhadap kestabilan *platform*. Model dinamika *platform* menggunakan bentuk *state space* (ruang keadaan). Sehingga didapatkan model dinamika *platform* seperti pada persamaan 3.1 dan 3.2.



$$\begin{aligned}\Sigma F &= m_1 \ddot{z}_1 \\ m_1 \ddot{z}_1(t) + (c_1 + c_2) \dot{z}_1(t) - c_2 \dot{z}_2(t) + (k_1 + k_2) z_1(t) \\ &\quad - k_2 z_2(t) + u(t) = 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_1 \ddot{z}_1(t) &= c_2 \dot{z}_2(t) - (c_1 + c_2) \dot{z}_1(t) + k_2 z_2(t) - (k_1 \\
&\quad + k_2) z_1(t) - u(t) \\
\ddot{z}_1(t) &= - \left(\omega_1^2 + \frac{m_2}{m_1} \omega_2^2 \right) z_1(t) + \frac{m_2}{m_1} \omega_2^2 z_2(t) - \frac{1}{m_1} u(t) - \\
2(\xi_1 \omega_1 + \frac{m_2}{m_1} \xi_2 \omega_2) \dot{z}_1(t) + 2 \frac{m_2}{m_1} \xi_2 \omega_2 \dot{z}_2(t)
\end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}
\Sigma F &= m_2 \ddot{z}_2(t) \\
c_2 \dot{z}_1(t) - c_2 \dot{z}_2(t) + k_2 z_1(t) - k_2 z_2(t) + u(t) &= m_2 \ddot{z}_2(t) \\
\ddot{z}_2(t) &= \frac{c_2}{m_2} \dot{z}_1(t) - \frac{c_2}{m_2} \dot{z}_2(t) + \frac{k_2}{m_2} z_1(t) - \frac{k_2}{m_2} z_2(t) \\
&\quad + \frac{1}{m_2} u(t) \\
\ddot{z}_2 &= \omega_2^2 z_1(t) + 2\xi_2 \omega_2 \dot{z}_1(t) - \omega_2^2 z_2(t) - 2\xi_2 \omega_2 \dot{z}_2(t) + \frac{1}{m_2} u(t)
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Persamaan 3.1 dan 3.2 disederhanakan dengan mensubstitusikan variable berikut

$$\begin{aligned}
A_{21} &= - \left(\omega_1^2 + \frac{m_2}{m_1} \omega_2^2 \right) \\
&= -0,8266 \\
A_{23} &= \frac{m_2}{m_1} \omega_2^2 \\
&= 0,0081 \\
A_{22} &= -2 \times (\xi_1 \omega_1 + \frac{m_2}{m_1} \xi_2 \omega_2) \\
&= -0,4974 \\
A_{24} &= 2 \frac{m_2}{m_1} \xi_2 \omega_2 \\
&= 0,0450 \\
A_{42} &= 2 \xi_2 \omega_2 \\
&= 4,5037 \\
A_{44} &= -2 \xi_2 \omega_2
\end{aligned}$$

$$= -4,5037$$

Sehingga persamaan dinamika *platform* menjadi seperti persamaan 3.3 dan 3.4.

$$\ddot{z}_1(t) = A_{21}z_1(t) + A_{23}z_2(t) - \frac{1}{m_1}u(t) - A_{22}\dot{z}_1(t) + A_{24}\dot{z}_2(t) \quad (3.3)$$

$$\ddot{z}_2 = \omega_2^2 z_1(f) + A_{42}\dot{z}_1(t) - \omega_2^2 z_2(t) + A_{44}\dot{z}_2(t) + \frac{1}{m_2}u(t) \quad (3.4)$$

Selanjutnya persamaan gerak 3.1 dan 3.2 ditulis dalam bentuk ruang keadaan seperti pada persamaan 3.5

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad x(0) = x_0 \quad (3.5)$$

$$y = C_x \quad (3.6)$$

x_0 adalah keadaan awal kemudian dicari nilai matriks A, B, dan D dengan menggunakan metode ruang keadaan. Pertama dilakukan pemisalan variable

$$u = z_1$$

$$\dot{u} = \dot{z}_1 = v$$

$$\dot{v} = \ddot{z}_1$$

$$w = z_2$$

$$\dot{w} = \dot{z}_2 = y$$

$$\dot{y} = \ddot{z}_2$$

Dengan mengasumsikan $x(t) := [u \ v \ w \ y]^T$ didapatkan persamaan 3.7

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \omega_2^2 & A_{42} & -\omega_2^2 & A_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/m_1 \\ 0 \\ 1/m_2 \end{bmatrix} u(t) \quad (3.7)$$

Maka didapatkan nilai matriks A, B, dan D seperti pada persamaan 3.8 sampai 3.10

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \omega_2^2 & A_{43} & -\omega_2^2 & A_{44} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -1/m_1 \\ 0 \\ 1/m_2 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Selanjutnya data perhitungan parameter *platform* disubstitusikan ke dalam matriks A dan B pada persamaan 3.8 dan 3.9 sehingga didapatkan nilai matriks A, B, dan C pada persamaan 3.11 sampai 3.13.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0,8266 & -0,4974 & 0,0081 & 0,0450 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0,8113 & 4,5037 & -0,8113 & -4,5037 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -1,2779 \times 10^{-7} \\ 0 \\ 1,2779 \times 10^{-5} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

3.5 Pemodelan Dinamika Gangguan

Pada tahap ini dilakukan pemodelan dinamika gangguan dengan tujuan untuk memrepresentasikan gangguan lingkungan yang terdapat pada lokasi *platform* dalam bentuk matematis sehingga dapat dilakukan analisa. Gangguan lingkungan dalam penelitian tugas akhir ini adalah gelombang laut. Gelombang laut yang digunakan mulai dari *sea state* 1 sampai *sea state* 6 seperti pada tabel 2.1.

Fungsi transfer dari gangguan gelombang dihitung dengan menggunakan persamaan 3.14

$$h(s) = \frac{K_w s}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (3.14)$$

Parameter K_w ditentukan bergantung pada *sea state*, ξ adalah rasio redaman relatif, dan ω_0 adalah parameter yang dirancang. Nilai ω_0 yang tinggi menandakan bahwa komponen gerakan frekuensi tinggi diperbolehkan di dalam pengulangan umpan balik dan nilai yang kecil ω_0 akan memberikan karakter gerakan yang halus pada platform. Nilai rasio redaman relatif harus bernilai kurang dari 1. Nilai ω_0 didapatkan dari persamaan 3.15.

$$\omega_0 = 0.4x \sqrt{\frac{g}{H_s}} \quad (3.15)$$

Nilai ω_0 untuk setiap *sea state* dihitung dengan menggunakan data dari tabel 2.1. Sehingga didapatkan nilai ω_0 untuk setiap *sea state* pada tabel 3.1

Tabel 3. 1 Nilai ω_0 untuk setiap *sea state*.

<i>Sea State</i>	Deskripsi	Ketinggian Gelombang (m)	ω_0
1	<i>calm (rippied)</i>	0.1	3.9598
2	<i>smooth</i>	0.5	2.2862
3	<i>slight</i>	1.25	1.1200
4	<i>moderate</i>	2.5	0.7919
5	<i>rough</i>	4	0.6261
6	<i>very rough</i>	6	0.5112

Nilai rasio redaman relative adalah 0.1. Nilai K_ω didapatkan dari persamaan 3.16.

$$K_\omega = 2\xi\omega_0\sigma_\omega \quad (3.16)$$

Nilai K_ω untuk setiap *sea state* dihitung dengan menggunakan data dari tabel 2.1. Sehingga didapatkan nilai K_ω untuk setiap *sea state* pada tabel 3.2

Tabel 3. 2 Nilai K_ω untuk setiap *sea state*

<i>Sea State</i>	Deskripsi	Ketinggian Gelombang (m)	K_ω
1	<i>calm (rippied)</i>	0.1	1.9878
2	<i>smooth</i>	0.5	1.1477
3	<i>slight</i>	1.25	0.5622
4	<i>moderate</i>	2.5	0.3976
5	<i>rough</i>	4	0.3143
6	<i>very rough</i>	6	0.2566

Selanjutnya dicari fungsi transfer dari gelombang pada setiap *sea state* dengan menggunakan data dari tabel 3.1 dan 3.2 Sehingga didapat persamaan 3.17 sampai 3.22

$$h(s)_1 = \frac{2.5026s}{s^2+0.7919s+15.68} \quad (3.17)$$

$$h(s)_2 = \frac{1.1192s}{s^2+0.3542s+3.136} \quad (3.18)$$

$$h(s)_3 = \frac{0.7078s}{s^2+0.224s+1.2544} \quad (3.19)$$

$$h(s)_4 = \frac{0.5005s}{s^2+0.1582s+0.6272} \quad (3.20)$$

$$h(s)_5 = \frac{0.3957s}{s^2+0.1252s+0.392} \quad (3.21)$$

$$h(s)_6 = \frac{0.4129s}{s^2+0.1307s+0.4268} \quad (3.22)$$

3.6 Analisis Keterkendalian dan Keteramatan *Model State Space* dari *Plant*

Pada tahap ini dilakukan analisis keterkendalian dan keteramatan *model state space* dari *plant offshore platform*. Dalam merancang sistem kendali *Linier Quadratic Gaussian* (LQG) faktor yang harus dipenuhi adalah kondisi *controlability* dan *observability*.

3.6.1. Analisis Keterkendalian (*Controlability*)

Suatu sistem didefinisikan terkendali apabila waktu dari perubahan keadaan 1 ke keadaan selanjutnya dapat ditentukan. Untuk mengetahui suatu sistem terkendali dilakukan perhitungan nilai P_c yang terdapat pada persamaan 3.23. Sistem didefinisikan stabil apabila nilai P_c tidak sama dengan nol.

$$P_c = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B] \quad (3.23)$$

Pada *plant* ini dilakukan analisis keterkendalian menggunakan bantuan *software* matlab. Analisis dilakukan menggunakan *function* “Ctrb” sehingga didapatkan nilai P_c sebesar 4. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *plant* terkendali.

3.6.2. Analisis Keteramatan (*Observability*)

Suatu sistem didefinisikan teramati apabila perubahan keadaan 1 ke keadaan selanjutnya dapat diamati. Untuk mengetahui suatu sistem teramati dilakukan perhitungan nilai P_o yang terdapat pada persamaan 3.24. Sistem didefinisikan stabil apabila nilai P_o tidak sama dengan nol.

$$P_o = [C' \ A' C' \ A'^2 C' \ \dots \ A'^{n-1} C'] \quad (3.24)$$

Pada *plant* ini dilakukan analisis keteramatan menggunakan bantuan *software* matlab. Analisis dilakukan menggunakan *function* “Obsv” sehingga didapatkan nilai P_o sebesar 4. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *plant* teramati.

3.6.3. Analisis Kestabilan *Platform*

Uji kestabilan sistem dilakukan dengan cara menganalisa nilai akar-akar karakteristik dari sistem. Sistem kendali *Linear Quadratic Gaussian (LQG)* dirancang menggunakan sistem dalam bentuk ruang keadaan atau *state-space*. Sehingga untuk mendapatkan nilai akar-akar karakteristik tidak dapat menggunakan *rootlocus*, namun dengan menganalisa nilai *eigenvalue* menggunakan persamaan 3.25.

$$|sI - A| = 0 \quad (3.25)$$

Persamaan 3.25 digunakan untuk menentukan nilai *eigenvalue* dari persamaan *state-space* yang telah didapat. Nilai *eigenvalue* merepresentasikan nilai akar-akar karakteristik sistem yang umum digunakan dalam persamaan fungsi transfer. Nilai

eigenvalue yang berada pada sebelah kiri sumbu imajiner atau memiliki nilai sumbu x negatif maka sistem dikatakan stabil.

Nilai *eigenvalue* pada *offshore platform* merupakan akar-akar persamaan determinan pada persamaan 3.25. Nilai matriks A dari *offshore platform* berasal dari persamaan 3.11.

$$|sI - A| = 0$$

$$\begin{aligned}
 & \left| s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0,8266 & -0,4974 & 0,0081 & 0,0450 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0,8113 & 4,5037 & -0,8113 & -4,5037 \end{bmatrix} \right| = 0 \\
 & \left| \begin{bmatrix} s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0,8266 & -0,4974 & 0,0081 & 0,0450 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0,8113 & 4,5037 & -0,8113 & -4,5037 \end{bmatrix} \right| = 0 \\
 & \left\| \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0,8266 & s + 0,4974 & 0,0081 & 0,0450 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0,8113 & 4,5037 & -0,8113 & s + 4,5037 \end{bmatrix} \right\| = 0 \quad (3.26)
 \end{aligned}$$

Nilai *eigenvalue* didapatkan dari nilai determinan matriks pada persamaan 3.26. Nilai-nilai *eigenvalue* dari sistem *offshore platform* seperti pada persamaan 3.27.

$$S_1 = -4.3637 + 0.0000i$$

$$S_2 = -0.2247 + 0.8712i$$

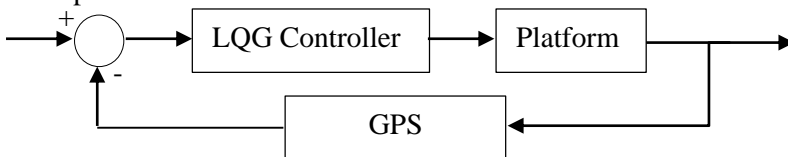
$$S_3 = -0.2247 - 0.8712i$$

$$S_4 = -0.1880 + 0.0000i \quad (3.27)$$

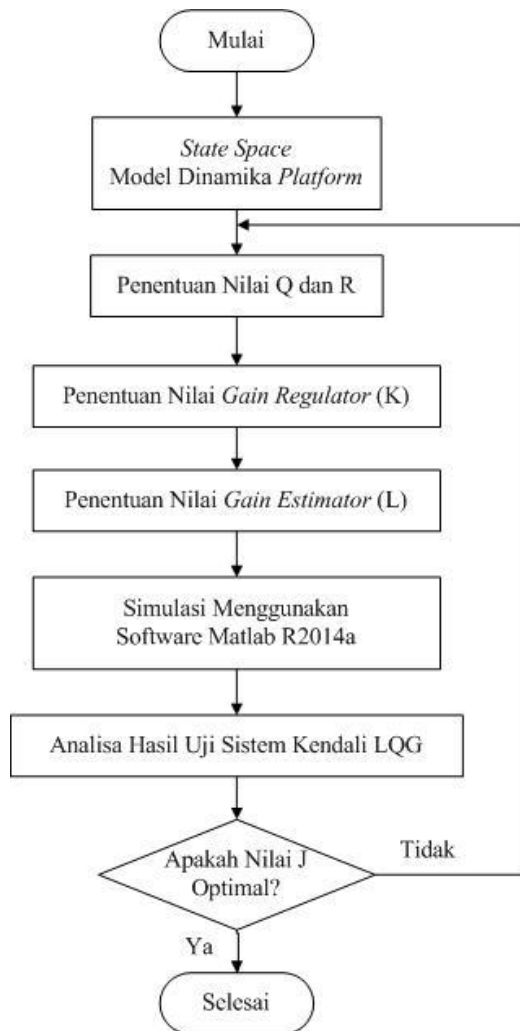
3.7 Perancangan Sistem Kendali *Linear Quadratic Gaussian*

Pada tahap ini dilakukan perancangan sistem kendali *Linear Quadratic Gaussian*. Sistem kendali *Linear Quadratic Gaussian* merupakan metode optimal yang berasal dari gabungan dua macam metode optimal sebelumnya yaitu *Linear Quadratic Regulator (LQR)* dan Kalman Filter (Supriyono, 2011). Metode *Linear Quadratic Regulator (LQR)* dirancang dengan cara menentukan sinyal masukan yang akan memindahkan suatu *state* sistem linier dari kondisi awal $x(t_0)$ menuju ke suatu kondisi akhir $x(t)$ yang menghasilkan indeks performansi minimum (Baihaqie, Muhammad Zulizar, et al, 2014). Filter Kalman adalah estimator optimal yang diterapkan pada sistem dinamik. Filter Kalman mengestimasi *state* dari suatu sistem linear yang berkembang secara dinamis terhadap fungsi waktu. Estimator optimal dapat didefinisikan sebagai suatu algoritma yang memproses seluruh data yang tersedia untuk memberikan sebuah estimasi dari *state* suatu sistem, sedangkan pada waktu yang sama mengestimasi beberapa kriteria pengoptimalan yang sudah diketahui sebelumnya. Persamaan filter kalman kontinu diperoleh dari penurunan persamaan filter kalman diskrit (Lewis F. L., 1986).

Diagram blok sistem pengendalian terdapat pada gambar 3.3. Sistem pengendalian ini menggunakan kendali *Linear Quadratic Gaussian (LQG)*, menggunakan *plant platform* yang telah terdapat aktuator berupa *active mass damper (AMD)*, dan sensor kecepatan berupa GPS.



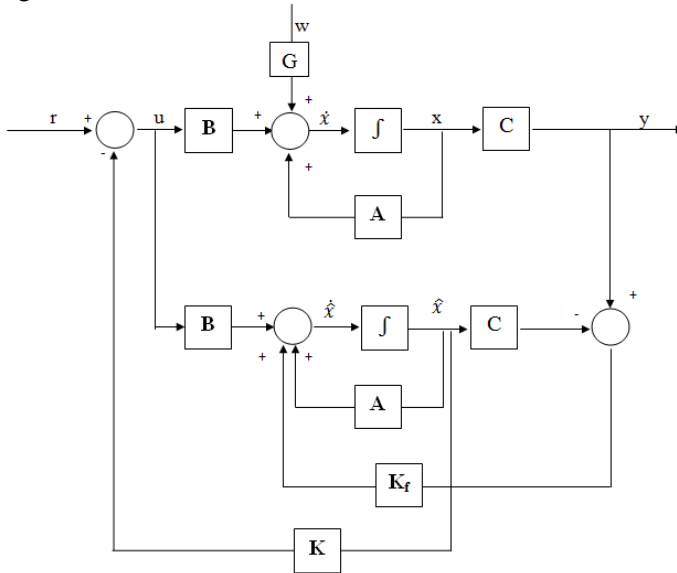
Perancangan sistem kendali *Linear Quadratic Gaussian* diterapkan terhadap model *state space* sistem dengan diagram alir seperti pada gambar 3.4.



Gambar 3. 3 Diagram alir perancangan sistem kendali LQG

Sistem kendali menggunakan *Linear Qudratic Gaussian* (LQG) dirancang dengan menggunakan bentuk persamaan *state-*

space pada *plant* yang dikendalikan sesuai dengan diagram blok pada gambar 3.5.



Gambar 3. 4 Diagram blok sistem kendali LQG (Lewis, Vrabie, & Syrmos, 2012)

Diagram blok sistem kendali LQG pada Gambar 3.4 memiliki beberapa nilai matriks yang disimbolkan dengan huruf A, B, C, dan fungsi transfer G. A merupakan matriks keadaan yang memiliki dimensi 4×4 didapatkan dari persamaan 3.8. B merupakan matriks kendali yang memiliki dimensi 4×1 didapatkan dari persamaan 3.9. C merupakan matriks pengukuran yang berfungsi memilih nilai keadaan yang akan ditampilkan. Matriks C memiliki dimensi 4×4 didapatkan dari persamaan 3.10. Nilai-nilai penyusun matriks A dan B didapatkan dari pemodelan dinamika platform. Sedangkan G merupakan fungsi transfer gangguan pada sistem atau biasa disebut *process disturbances*. Fungsi transfer G didapatkan dari pemodelan dinamik gelombang laut. Diagram blok sistem LQG juga memiliki dua gain yang disimbolkan dengan huruf K dan K_f . Gain K dan K_f dirancang secara terpisah. Gain K merupakan gain

regulator yang dirancang dengan metode Linear Quadratic Regulator (LQR). Sedangkan gain K_f merupakan gain filter kalman yang dirancang dengan metode kalman filter.

2.5.1 Perancangan Gain Regulator

Perancangan gain regulator dilaksanakan dengan mencari nilai Q dan R agar indeks performansi minimum dengan menggunakan 49 kombinasi seperti pada tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Nilai indeks Performansi Regulator

No	Diag $Q_{4 \times 4}$	Diag $R_{4 \times 4}$	J
1	0.0001	1000	1.64E-04
2	0.0001	100	1.64E-04
3	0.0001	10	1.64E-04
4	0.0001	1	1.64E-04
5	0.0001	0.1	1.64E-04
6	0.0001	0.01	1.64E-04
7	0.0001	0.001	1.64E-04
8	0.001	1000	1.64E-03
9	0.001	100	1.64E-03
10	0.001	10	1.64E-03
11	0.001	1	1.64E-03
12	0.001	0.1	1.64E-03
13	0.001	0.01	1.64E-03
14	0.001	0.001	1.64E-03
15	0.01	1000	1.64E-02
16	0.01	100	1.64E-02
17	0.01	10	1.64E-02
18	0.01	1	1.64E-02
19	0.01	0.1	1.64E-02
20	0.01	0.01	1.64E-02
21	0.01	0.001	1.64E-02

No	Q Diag(4x4)	R Diag(4x4)	J
22	0.1	1000	1.64E-01
23	0.1	100	1.64E-01
24	0.1	10	1.64E-01
25	0.1	1	1.64E-01
26	0.1	0.1	1.64E-01
27	0.1	0.01	1.64E-01
28	0.1	0.001	1.64E-01
29	1	1000	1.64E+00
30	1	100	1.64E+00
31	1	10	1.64E+00
32	1	1	1.64E+00
33	1	0.1	1.64E+00
34	1	0.01	1.64E+00
35	1	0.001	1.64E+00
36	10	1000	1.64E+01
37	10	100	1.64E+01
38	10	10	1.64E+01
39	10	1	1.64E+01
40	10	0.1	1.64E+01
41	10	0.01	1.64E+01
42	10	0.001	1.64E+01
43	100	1000	1.64E+02
44	100	100	1.64E+02
45	100	10	1.64E+02
46	100	1	1.64E+02
47	100	0.1	1.64E+02
48	100	0.01	1.64E+02
49	100	0.001	1.64E+02

Nilai gain regulator K dari 49 kombinasi pembobotan nilai Q dan R didapatkan seperti pada tabel 3.4. Selanjutnya dipilih kombinasi no 1 dengan pembobotan nilai $Q=0,0001$ (matriks diagonal 4×4) dan nilai $R=0,001$ (matriks diagonal 4×4).

3.7.2 Perancangan Gain Estimator (Filter Kalman)

Perancangan gain regulator dilaksanakan dengan mencari nilai Q_n dan R_n agar indeks performansi minimum seperti pada tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Nilai Indeks Performansi Filter Kalman

No	Diag $Q_{4 \times 4}$	Diag $R_{4 \times 4}$	J
1	0.0001	1000	2.01E+02
2	0.0001	100	2.01E+01
3	0.0001	10	2.01E+00
4	0.0001	1	2.01E-01
5	0.0001	0.1	2.03E-02
6	0.0001	0.01	2.17E-03
7	0.0001	0.001	3.64E-04
8	0.001	1000	2.01E+02
9	0.001	100	2.01E+01
10	0.001	10	2.01E+00
11	0.001	1	2.03E-01
12	0.001	0.1	2.17E-02
13	0.001	0.01	3.64E-03
14	0.001	0.001	1.84E-03
15	0.01	1000	2.01E+02
16	0.01	100	2.01E+01
17	0.01	10	2.03E+00
18	0.01	1	2.17E-01
19	0.01	0.1	3.64E-02
20	0.01	0.01	1.84E-02

No	Diag $Q_{4 \times 4}$	Diag $R_{4 \times 4}$	J
21	0.01	0.001	1.66E-02
22	0.1	1000	2.01E+02
23	0.1	100	2.03E+01
24	0.1	10	2.17E+00
25	0.1	1	3.64E-01
26	0.1	0.1	1.84E-01
27	0.1	0.01	1.66E-01
28	0.1	0.001	1.64E-01
29	1	1000	2.03E+02
30	1	100	2.17E+01
31	1	10	3.64E+00
32	1	1	1.84E+00
33	1	0.1	1.66E+00
34	1	0.01	1.64E+00
35	1	0.001	1.64E+00
36	10	1000	2.17E+02
37	10	100	3.64E+01
38	10	10	1.84E+01
39	10	1	1.66E+01
40	10	0.1	1.64E+01
41	10	0.01	1.64E+01
42	10	0.001	1.64E+01
43	100	1000	3.64E+02
44	100	100	1.84E+02
45	100	10	1.66E+02
46	100	1	1.64E+02
47	100	0.1	1.64E+02
48	100	0.01	1.64E+02

No	Diag $Q_{4 \times 4}$	Diag $R_{4 \times 4}$	J
49	100	0.001	1.64E+02

Nilai pembobotan Q dan R dipilih dari nilai performansi yang paling minimum yaitu pada persamaan 3.29 dan 3.30.

$$Q = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0001 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0,001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,001 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Nilai Q dan R pada persamaan 3.29 dan 3.30 digunakan untuk merancang nilai gain regulator K. Nilai K dirancang menggunakan bantuan software matlab dengan fuction lqr. Sehingga didapatkan nilai gain K pada persamaan 3.31.

$$K = [-6,0343 \times 10^{-13} \quad 4,4176 \times 10^{-13} \quad 7,8754 \times 10^{-13} \quad 3,1980 \times 10^{-13}] \quad (3.31)$$

Setelah didapatkan gain regulator K lalu dirancang nilai gain estimator filter kalman Kf. Nilai gain Kf dirancang dengan menggunakan 49 kombinasi nilai Qn dan Rn pada seperti pada tabel 3.7. Nilai Qn berasal dari noise covariance sistem terdapat pada persamaan 3.32

$$Qn = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0 \\ 0 & 0.0001 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Sedangkan nilai Rn yang digunakan untuk merancang gain Kf terdapat pada persamaan 3.33

$$Rn = \begin{bmatrix} 0.001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.001 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Nilai Qn dan Rn pada persamaan 3.32 dan 3.33 digunakan untuk merancang nilai gain estimator filter kalman Kf. Nilai Kf dirancang menggunakan bantuan software matlab dengan fuction kalman. Sehingga didapatkan nilai gain Kf pada persamaan 3.34.

$$Kf = \begin{bmatrix} 7,9853 \times 10^{-17} & -5,2692 \times 10^{-20} & 7,8087 \times 10^{-17} & -3,6030 \times 10^{-15} \\ -5,2692 \times 10^{-20} & 2,2785 \times 10^{-16} & 3,6086 \times 10^{-15} & -1,6254 \times 10^{-14} \\ 7,8087 \times 10^{-17} & 3,6086 \times 10^{-15} & 2,2339 \times 10^{-12} & 1,6657 \times 10^{-16} \\ -3,6030 \times 10^{-15} & -1,6254 \times 10^{-14} & 1,6657 \times 10^{-16} & 1,7961 \times 10^{-12} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

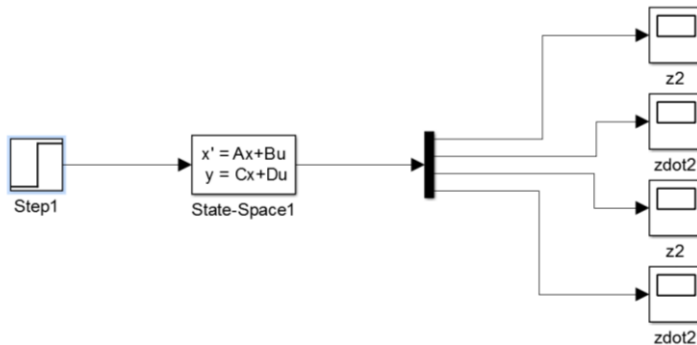
Nilai gain regulator K dan gain estimator Kf dimasukkan dalam simulasi uji *close loop*.

3.8 Simulasi dan Pengujian Sistem Kendali Linear Quadratic Gaussian (LQG)

Simulasi dan pengujian sistem kendali linear quadratic Gaussian (LQG) dilakukan untuk menganalisa respon sistem secara open loop, close loop, dengan gangguan dan tanpa gangguan. Respon sistem tersebut digunakan untuk mengetahui karakteristik dinamik dari sistem *offshore platform*.

3.8.1 Uji Open Loop Sistem

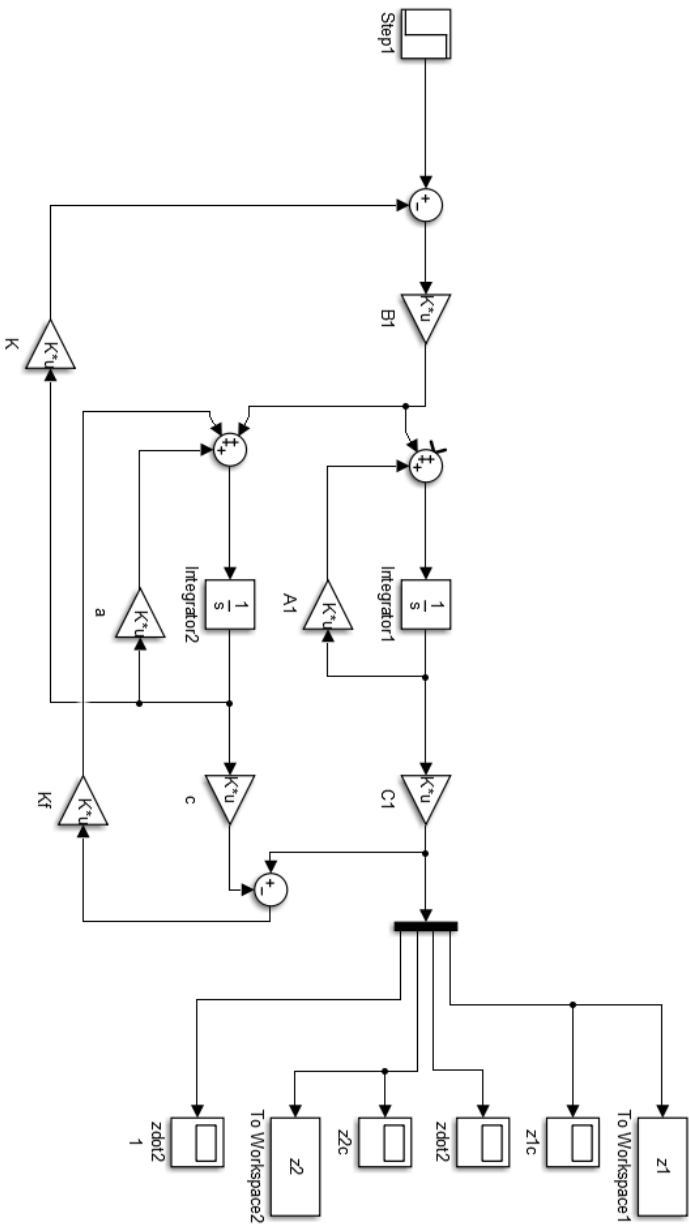
Uji open loop sistem dilakukan untuk menganalisa respon dinamik dari *platform* ketika tidak digunakan kendali LQG. Uji ini dilakukan dengan memberi sinyal step pada sistem. Simulasi uji open loop dilakukan menggunakan bantuan Simulink dari software matlab r2014. Model simulasi uji open loop terdapat pada gambar 3.6.



Gambar 3. 5 Model simulasi open loop sistem

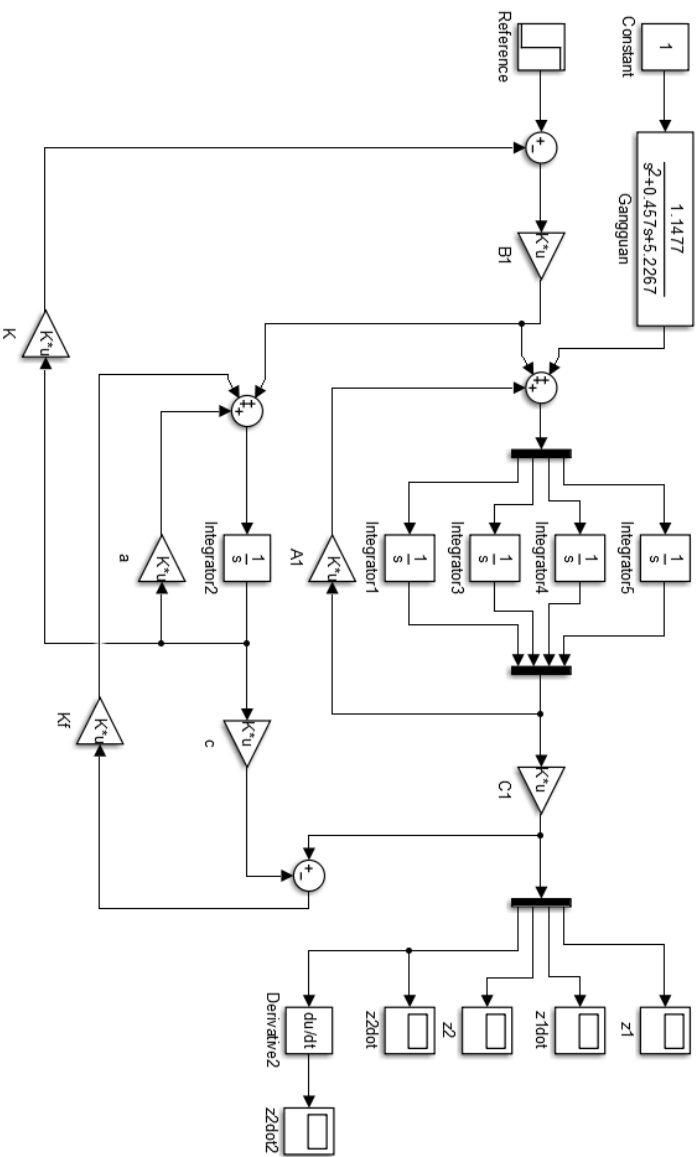
3.8.2 Uji Close Loop Sistem Tanpa Gangguan

Uji close loop sistem tanpa gangguan dilakukan menganalisa respon dinamik dari *platform* ketika digunakan kendali LQG. Uji ini dilakukan dengan memberi gain regulator dan filter kalman pada sistem. Simulasi uji close loop tanpa gangguan dilakukan menggunakan bantuan Simulink dari software matlab r2014. Model simulasi uji close loop terdapat pada gambar 3.8.



3.8.3 Uji Close Loop Sistem Dengan Gangguan

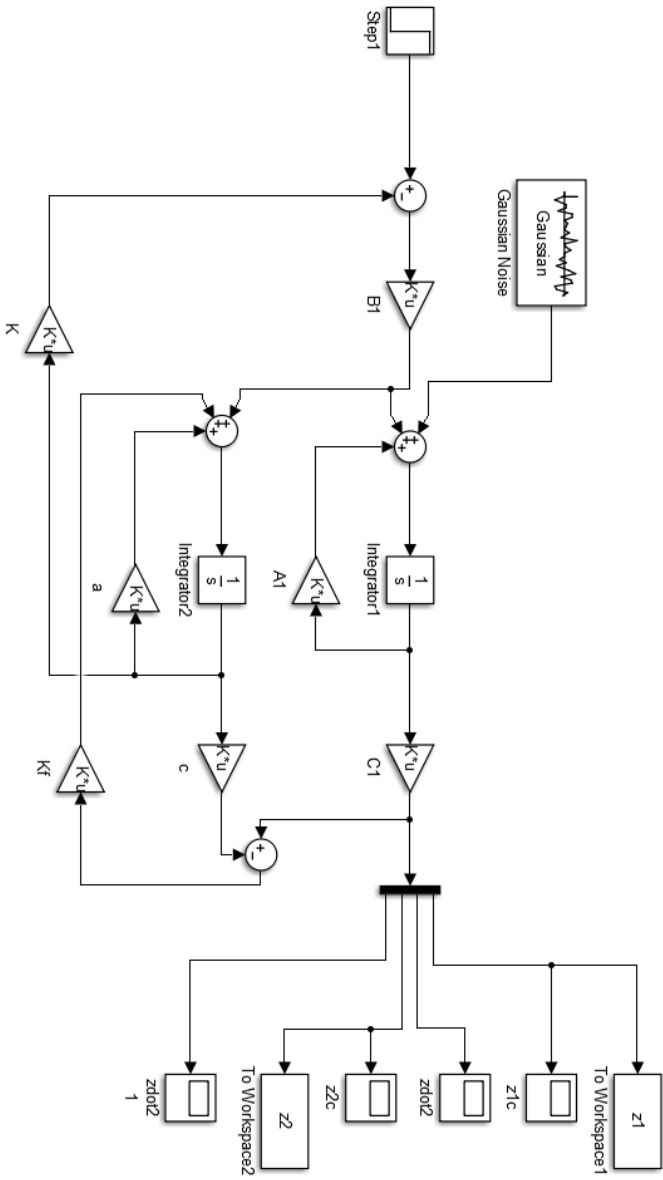
Uji close loop sistem dengan gangguan dilakukan menganalisa respon dinamik dari platform ketika digunakan kendali LQG dan diberikan gangguan dari sea state 1 sampai 9. Simulasi uji close loop dengan gangguan dilakukan menggunakan bantuan Simulink dari software matlab r2014. Model simulasi uji close loop terdapat pada gambar 3.9.



Gambar 3. 7 Model simulasi close loop sistem dengan gangguan

3.8.4 Uji Close Loop Sistem Dengan Gangguan Gaussian

Uji close loop sistem dengan gangguan Gaussian dilakukan menganalisa respon dinamik dari platform ketika digunakan kendali LQG dan diberikan gangguan gaussian. Simulasi uji close loop dengan gangguan gaussian dilakukan menggunakan bantuan Simulink dari software matlab r2014. Model simulasi uji close loop terdapat pada gambar 3.8.



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Uji Kestabilan Sistem

Hasil uji kestabilan sistem menghasilkan nilai eigenvalue dari sistem *offshore platform* seperti pada persamaan 4.1.

$$S_1 = -4.3637 + 0.0000i$$

$$S_2 = -0.2247 + 0.8712i$$

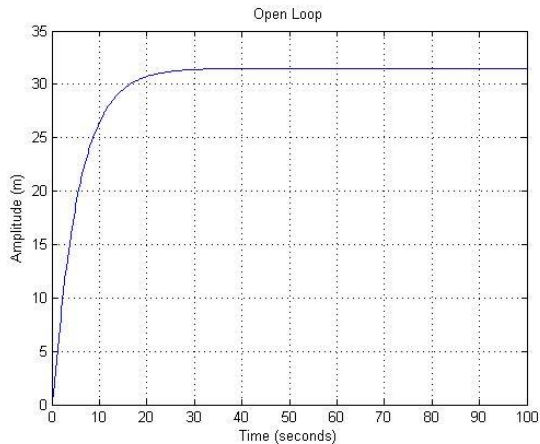
$$S_3 = -0.2247 - 0.8712i$$

$$S_4 = -0.1880 + 0.0000i \quad (4.1)$$

Dari nilai *eigenvalue* pada persamaan 4.1 dapat diketahui bahwa nilai akar-akar karakteristik dari sistem *offshore platform* bernilai negatif. Akar-akar karakteristik yang bernilai negatif artinya berada disebelah kiri sumbu imajiner sehingga sistem dapat disimpulkan stabil.

4.2 Analisa Respon Open Loop Sistem

Respon *open loop* sistem didapatkan dari simulasi uji *open loop* sistem *offshore platform* dalam kondisi tanpa pengendali LQG dengan masukan berupa sinyal step. Uji respon open loop dilakukan dengan menggunakan Simulink pada matlab. Respon sistem yang diperoleh dari simulasi uji open loop terdapat pada gambar 4.1

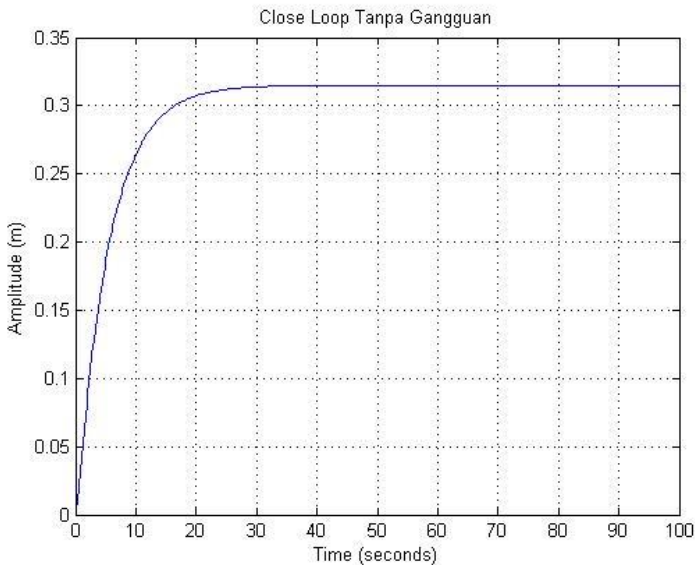


Gambar 4. 1 Respon Uji Open Loop Sistem

Pada respon open loop gambar 4.1 dapat diketahui bahwa respon sistem tidak memiliki nilai maximum overshoot. Respon menunjukkan bahwa sistem *steady* pada amplitudo 30,5m. Hal tersebut berarti sistem mengalami perpindahan sebesar 30,5m. Standar perpindahan yang diijinkan dalam *platform* ini adalah 10% dari kedalaman *platform* yaitu sebesar 21,8m. Berdasarkan hasil respon tersebut maka dapat dikatakan bahwa perpindahan platform melewati batas toleransi yang diijinkan sehingga dibutuhkan suatu sistem kendali.

4.3 Analisa Respon Uji *Close-Loop* Sistem Tanpa Gangguan

Uji *close-loop* sistem tanpa gangguan dilakukan dengan memberikan sistem kontrol LQG dalam bentuk sistem ruang keadaan (*state space*) tanpa menggunakan gangguan. Respon sistem terdapat pada gambar 4.2



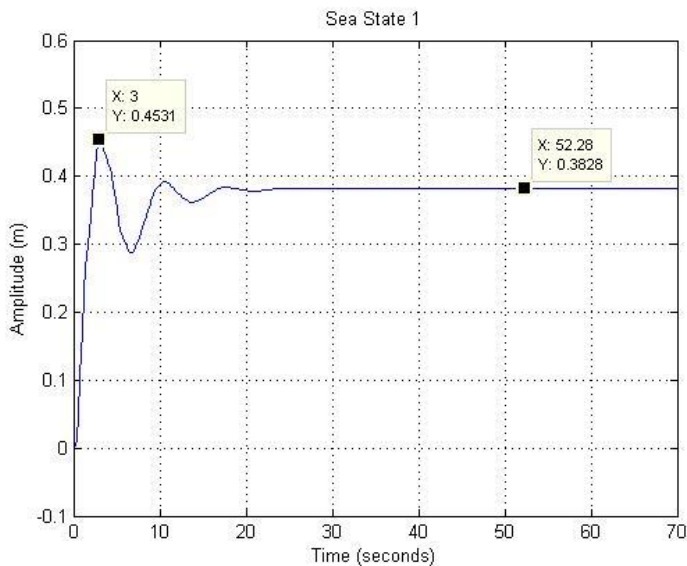
Gambar 4. 2 Respon Uji Close Loop Sistem tanpa gangguan

Pada respon close loop dilakukan implementasi sistem kendali LQG yang ditunjukkan pada gambar 4.2. Respon sistem pada uji *close loop* tanpa gangguan tidak memiliki nilai maximum

overshoot. Respon menunjukkan bahwa sistem *steady* pada amplitudo 0,315m. Hal tersebut berarti sistem mengalami perpindahan sebesar 0,315m. Standar perpindahan yang diijinkan dalam *platform* ini adalah 10% dari kedalaman *platform* yaitu sebesar 21,8m. Berdasarkan hasil respon tersebut maka dapat dikatakan bahwa perpindahan platform tidak melewati batas toleransi yang diijinkan.

4.4 Analisa Respon Uji *Close-Loop* Sistem dengan Gangguan Sea State 1

Uji close-loop sistem dengan gangguan dilakukan dengan memberikan sistem kontrol LQG dalam bentuk sistem ruang keadaan (state space). Respon sistem terdapat pada gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Respon Uji *Close Loop* Sistem dengan gangguan sea state 1

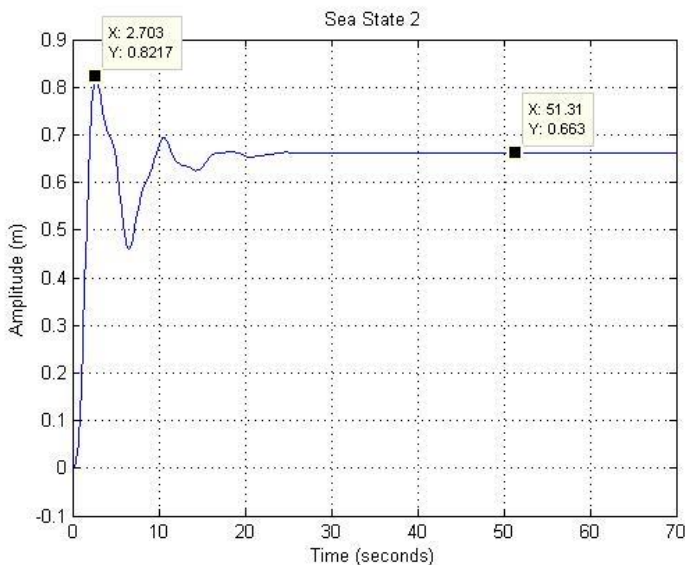
Pada respon *close loop* dilakukan implementasi sistem kendali LQG dan diberi gangguan sea state 1 yang ditunjukkan pada gambar 4.3. Sistem memiliki respon dengan nilai maximum overshoot sebesar 0,4531m pada waktu 3s, settling time sebesar

52,28s, dan eror sebesar 0,3828m. Standar perpindahan yang diijinkan dalam *platform* ini adalah 10% dari kedalaman *platform* yaitu sebesar 21,8m. Berdasarkan hasil respon tersebut maka dapat dikatakan bahwa perpindahan platform tidak melewati batas toleransi yang diijinkan.

Standar batas percepatan *platform* yang diijinkan untuk pekerja bekerja di *offshore* adalah $1,96\text{m/s}^2$. Sedangkan percepatan maksimum *platform* yaitu $0,1621\text{m/s}^2$. Berdasarkan nilai tersebut maka dapat dikatakan bahwa percepatan platform tidak melewati batas toleransi yang diijinkan.

4.5 Analisa Respon Uji *Close-Loop* Sistem dengan Gangguan Sea State 2

Uji close-loop sistem dengan gangguan dilakukan dengan memberikan sistem kontrol LQG dalam bentuk sistem ruang keadaan (state space). Respon sistem terdapat pada gambar 4.4.



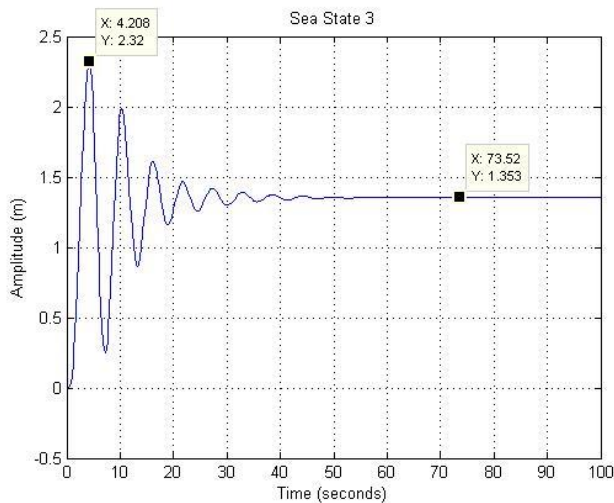
Gambar 4. 4 Respon uji *close loop* sistem dengan gangguan *sea state 2*

Pada respon *close loop* dilakukan implementasi sistem kendali LQG dan diberi gangguan *sea state 2* yang ditunjukkan pada gambar 4.4. Sistem memiliki respon dengan nilai maximum overshoot sebesar 0,8217m pada waktu 2,703s, settling time sebesar 51,31s, dan eror sebesar 0,663m. Standar perpindahan yang diijinkan dalam *platform* ini adalah 10% dari kedalaman *platform* yaitu sebesar 21,8m. Berdasarkan hasil respon tersebut maka dapat dikatakan bahwa perpindahan platform tidak melewati batas toleransi yang diijinkan.

Standar batas percepatan *platform* yang diijinkan untuk pekerja bekerja di *offshore* adalah $1,96\text{m/s}^2$. Sedangkan percepatan maksimum platform yaitu $0,4179\text{m/s}^2$. Berdasarkan nilai tersebut maka dapat dikatakan bahwa percepatan platform tidak melewati batas toleransi yang diijinkan.

4.6 Analisa Respon Uji *Close-Loop* Sistem dengan Gangguan Sea State 3

Uji close-loop sistem dengan gangguan dilakukan dengan memberikan sistem kontrol LQG dalam bentuk sistem ruang keadaan (state space). Respon sistem terdapat pada gambar 4.5.



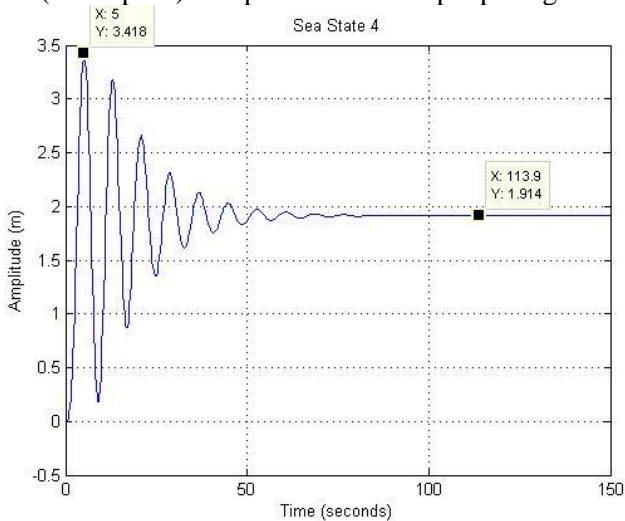
Gambar 4. 5 Respon Uji *Close Loop* Sistem dengan gangguan *sea state 3*

Pada respon *close loop* dilakukan implementasi sistem kendali LQG dan diberi gangguan *sea state* 3 yang ditunjukkan pada gambar 4.7. Sistem memiliki respon dengan nilai maximum overshoot sebesar 2,32m pada waktu 4,208s, settling time sebesar 73,52s, dan eror sebesar 1,353m. Standar perpindahan yang diijinkan dalam *platform* ini adalah 10% dari kedalaman *platform* yaitu sebesar 21,8m. Berdasarkan hasil respon tersebut maka dapat dikatakan bahwa perpindahan platform tidak melewati batas toleransi yang diijinkan.

Standar batas percepatan *platform* yang diijinkan untuk pekerja bekerja di *offshore* adalah $1,96\text{m/s}^2$. Sedangkan percepatan maksimum platform yaitu $0,7883\text{m/s}^2$. Berdasarkan nilai tersebut maka dapat dikatakan bahwa percepatan platform tidak melewati batas toleransi yang diijinkan.

4.7 Analisa Respon Uji *Close-Loop* Sistem dengan Gangguan Sea State 4

Uji close-loop sistem dengan gangguan dilakukan dengan memberikan sistem kontrol LQG dalam bentuk sistem ruang keadaan (state space). Respon sistem terdapat pada gambar 4.6.



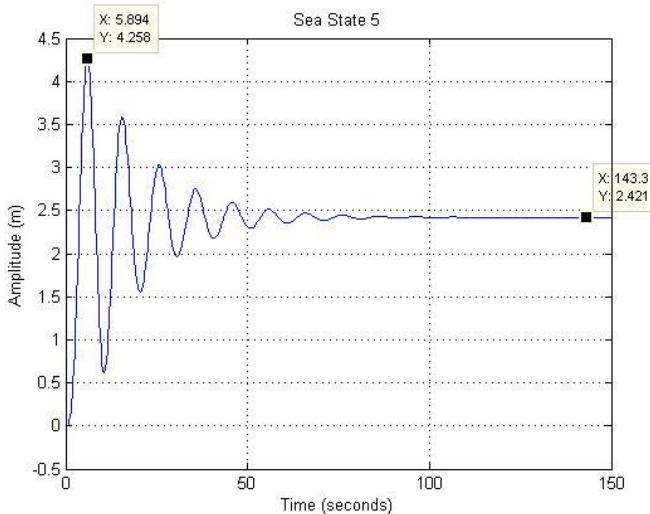
Gambar 4. 6 Respon Uji Close Loop Sistem dengan gangguan *sea state* 4

Pada respon *close loop* dilakukan implementasi sistem kendali LQG dan diberi gangguan *sea state 4* yang ditunjukkan pada gambar 4.9. Sistem memiliki respon dengan nilai maximum overshoot sebesar 3,418m pada waktu 5s, settling time sebesar 113,9s, dan eror sebesar 1,914m. Standar perpindahan yang diijinkan dalam *platform* ini adalah 10% dari kedalaman *platform* yaitu sebesar 21,8m. Berdasarkan hasil respon tersebut maka dapat dikatakan bahwa perpindahan platform tidak melewati batas toleransi yang diijinkan.

Standar batas percepatan *platform* yang diijinkan untuk pekerja bekerja di *offshore* adalah $1,96\text{m/s}^2$. Sedangkan percepatan maksimum platform yaitu $0,8782\text{m/s}^2$. Berdasarkan nilai tersebut maka dapat dikatakan bahwa percepatan platform tidak melewati batas toleransi yang diijinkan.

4.8 Analisa Respon Uji *Close-Loop* Sistem dengan Gangguan Sea State 5

Uji *close-loop* sistem dengan gangguan dilakukan dengan memberikan sistem kontrol LQG dalam bentuk sistem ruang keadaan (state space). Respon sistem terdapat pada gambar 4.7.



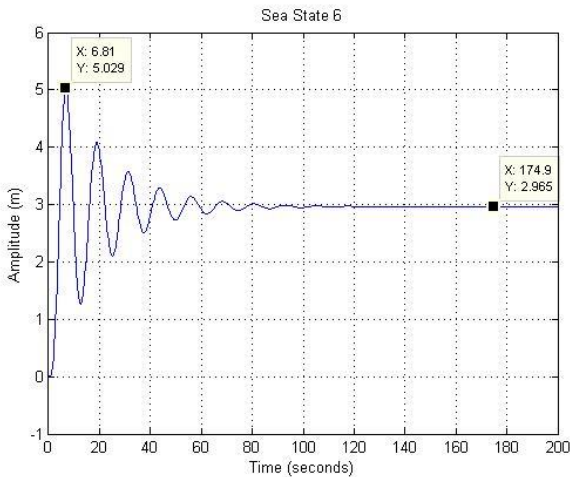
Gambar 4. 7 Respon Uji *Close Loop* Sistem dengan gangguan *sea state 5*

Pada respon *close loop* dilakukan implementasi sistem kendali LQG dan diberi gangguan *sea state 5* yang ditunjukkan pada gambar 4.11. Sistem memiliki respon dengan nilai maximum overshoot sebesar 4,258m pada waktu 5,894s, settling time sebesar 143,3s, dan eror sebesar 2,421m. Standar perpindahan yang diijinkan dalam *platform* ini adalah 10% dari kedalaman *platform* yaitu sebesar 21,8m. Berdasarkan hasil respon tersebut maka dapat dikatakan bahwa perpindahan *platform* tidak melewati batas toleransi yang diijinkan.

Standar batas percepatan *platform* yang diijinkan untuk pekerja bekerja di *offshore* adalah $1,96\text{m/s}^2$. Sedangkan percepatan maksimum *platform* yaitu $0,7906\text{m/s}^2$. Berdasarkan hasil tersebut maka dapat dikatakan bahwa percepatan *platform* tidak melewati batas toleransi yang diijinkan.

4.9 Analisa Respon Uji *Close-Loop* Sistem dengan Gangguan Sea State 6

Uji *close-loop* sistem dengan gangguan dilakukan dengan memberikan sistem kontrol LQG dalam bentuk sistem ruang keadaan (state space) dengan menggunakan gangguan *sea state 6*. Respon sistem terdapat pada gambar 4.8.



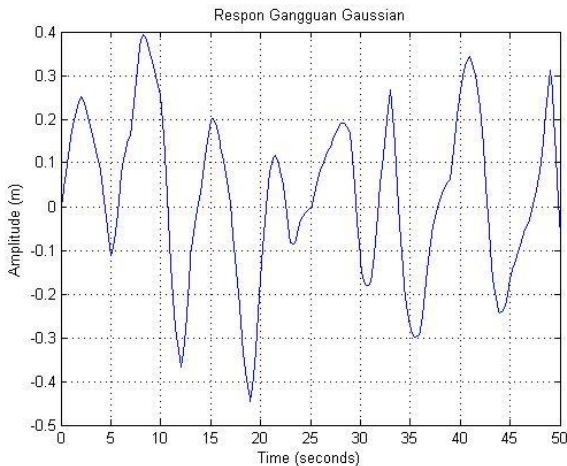
Gambar 4. 8 Respon Uji *Close Loop* Sistem dengan gangguan *sea state 6*

Pada respon *close loop* dilakukan implementasi sistem kendali LQG dan diberi gangguan *sea state 6* yang ditunjukkan pada gambar 4.13. Sistem memiliki respon dengan nilai maximum overshoot sebesar 5,029m pada waktu 6,81s, settling time sebesar 174,9s, dan eror sebesar 2,965m. Standar perpindahan yang diijinkan dalam *platform* ini adalah 10% dari kedalaman *platform* yaitu sebesar 21,8m. Berdasarkan hasil respon tersebut maka dapat dikatakan bahwa perpindahan platform tidak melewati batas toleransi yang diijinkan.

Standar batas percepatan *platform* yang diijinkan untuk pekerja bekerja di *offshore* adalah $1,96\text{m/s}^2$. Sedangkan percepatan maksimum platform yaitu $0,7422\text{m/s}^2$. Berdasarkan nilai tersebut maka dapat dikatakan bahwa percepatan platform tidak melewati batas toleransi yang diijinkan.

4.10 Analisa Respon Uji Close-Loop Sistem dengan Gangguan Gaussian

Uji close-loop sistem dengan gangguan Gaussian dilakukan dengan memberikan sistem kontrol LQG dalam bentuk sistem ruang keadaan (state space) dengan menggunakan gangguan gaussian. Respon sistem terdapat pada gambar 4.12.



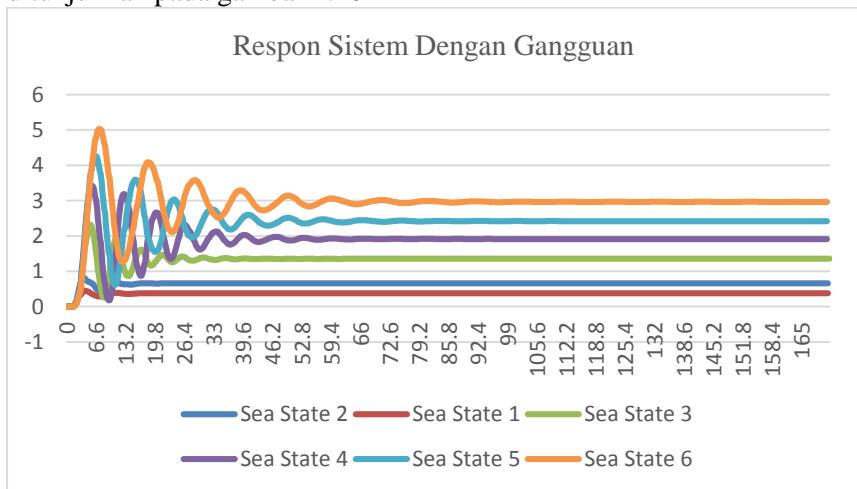
Gambar 4. 9 Respon Uji Close Loop Sistem dengan gangguan gaussian

Pada gambar 4.15 Dapat disimpulkan bahwa sistem kendali LQG masih dapat mengikuti gangguan dengan fungsi Gaussian yang diberikan. Sistem kendali LQG juga masih dapat mengendalikan *offshore platform* untuk mengikuti set point yang telah ditentukan. Sehingga sistem kendali LQG dapat dibuktikan bersifat robust terhadap gangguan yang berupa gelombang.

Standar batas percepatan *platform* yang diijinkan untuk pekerja bekerja di *offshore* adalah $1,96\text{m/s}^2$. Sedangkan percepatan maksimum platform yaitu $0,6919\text{m/s}^2$. Berdasarkan nilai tersebut maka dapat dikatakan bahwa percepatan platform tidak melewati batas toleransi yang diijinkan.

4.11 Pembahasan

Respon uji dengan gangguan *sea state* 1 sampai 6 ditunjukkan pada gambar 4.10



Gambar 4. 10 Respon sistem dengan gangguan sea state 1 sampai 6

Nilai parameter respon sistem dari simulasi ditunjukkan pada tabel 4.1. Pada tabel 4.1. terdapat nilai parameter respon yaitu maksimum overshoot, settling time, dan eror dari respon sistem

dengan gangguan sea state 1 hingga 6. Hasil dari simulasi menunjukkan beberapa nilai karakteristik respon yaitu nilai maksimum overshoot terbesar 5,029m, nilai settling terbesar 174,9s, nilai eror terbesar 2,965m, dan percepat maksimum terbesar 0,8782m/s².

Tabel 4. 1 Data hasil simulasi

<i>Sea State</i>	<i>Maksimum Oversoot (m)</i>	<i>Settling Time (s)</i>	<i>Error (m)</i>	<i>Percepatan (m/s²)</i>
1	0,4531	52,28	0,3828	0,1621
2	0,8217	51,31	0,663	0,4179
3	2,32	73,52	1,353	0,7883
4	3,418	113,9	1,914	0,8782
5	4,258	143,3	2,421	0,7906
6	5,029	174,9	2,965	0,7422

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapatkan dari Tugas Akhir ini yakni sebagai berikut :

1. Sistem kendali *Linear Quadratic Gaussian (LQG)* dapat diterapkan dalam sistem kendali *offshore platform* dengan menggunakan persamaan sistem bentuk ruang keadaan (*state-space*). Perancangan sistem kendali LQG dengan parameter control diag $Q_{4 \times 4} = 0,0001$, diag $R_{4 \times 4} = 0,001$, diag $Q_{n4 \times 4} = 0,0001$, dan diag $R_{n4 \times 4} = 0,001$.
2. Berapa batas toleransi frekuensi gangguan agar sistem tetap stabil adalah pada gangguan gelombang sea state 6 dengan ketinggian gelombang 6m dan frekuensi $0,5112s^{-1}$. Gangguan gelombang sea state 6 memiliki *maximum overshoot* sebesar 5,029m, *settling time* sebesar 174,9s, dan eror sebesar 2,965m.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya antara lain :

1. Penambahan variasi gangguan lingkungan lainnya seperti angin, arus, dan lainnya.
2. Sistem kendali *Linear Quadratic Gaussian* dapat diumpangkan ke control fuzzy logic yang diadaptif dengan sistem kendali LQG untuk mendapatkan performansi yang lebih baik.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M. A. (2015). *PERANCANGAN SISTEM KENDALI LOGIKA FUZZY KAPAL PERANG KAWAL RUDAL – KRI DIPONEGORO KELAS SIGMA UNTUK MEMPEROLEH SINYAL KENDALI OPTIMAL*. Jurusan Teknik Fisika-ITS.
- Agustinus, M. (2016). *Ini Wilayah Penghasil Minyak dan Gas Terbesar di RI*. Jakarta: Detik Finance.
- Baihaqie, Muhammad Zulizar, et all. (2014). ANALISIS GERAKAN SWAY, HEAVE, DAN ROLL PADA OFFSHORE PLATFORM MENGGUNAKAN METODE KONTROL OPTIMAL LINEAR QUADRATIC REGULATOR. *Jurusan Teknik Fisika*.
- Bryson, A. r., & Ho, Y.-C. (1975). *Applied Optimal Control*.
- Cimen, T. (2008). State-Dependent Riccati Equation (SDRE) Control : A Survey. *IFAC*.
- Eide, R. e. (2011). LQG Control Design for Balancing an Inverted Pendulum Mobile.
- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicle*.
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. USA: John Willey & Sons, Inc.
- Juliana. (2014). Kontrol Optimal pada Balancing Robot Menggunakan Linear Quadratic Regulator. *e-jurnal Teknik Elektro*.
- Lewis, F. L. (1986). *Optimal Estimation with an Introduction to Stochastic Control Theory*. Georgia: Scholl of Electrical Engineering, Georgia Institute of Technology Atlanta.
- Lewis, F. L., Vrabie, D., & Syrmos, V. L. (2012). *Optimal Control*.

- Ogata, K. (2002). *Modern Control Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Prasetyono, G. (2009). *Desain and Simulation LQR Control System for Control Bus Suspension of Half Car Model with Passenger*. Surabaya.
- Reddy, D. V., & Swamidas, A. (2014). *Essentials of Offshore Structure*. Boca Raton: CRC Press. *Resolution MSC, Vol.137*. (2002).
- Rodliyah, Dinayati, et all. (2010). PERANCANGAN SISTEM KENDALI OPTIMAL MULTIVARIABEL LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN (LQG) PADA KAPAL FPB 38 UNTUK MENINGKATKAN PERFORMANSI MANUVERING. *Jurusan Teknik Fisika*.
- Sadeghi, K. (2017). An Overview of Design, Analysis, Construction, and Installation of Offshore Petroleum Platforms Suitable for Cyprus Oil/Gas Fields.
- Supriyono. (2011). Perancangan dan Simulasi Pengendalian Sistem Gerak Rotasi Quadroter Menggunakan Linear quadratic Gaussian (LQG). *Universitas Indonesia*.
- Xu, Y. M., Zhang, B. L., Cun, W. J., & Xie, J. (2016). Fuzzy H_{∞} Control for Offshore Steel Jacket Platforms with Parameter Uncertainties.
- Zhang, B. L., Liu, Y. J., Ma, H., & Tang, G. Y. (2014). Discrete Feedforward And Feedback Optimal Tracking Control For Offshore Steel Jacket Platforms.
- Zhang, B. L., Ma, L., & Han, Q. L. (2012). Sliding Mode H_{∞} Control for Offshore Steel Jacket Platforms Subject to Nonlinear Self-Excited Wave Force and External Disturbance.

LAMPIRAN

Code Matlab

```
clc, clear
```

```
A=[0,1,0,0;-4.19079,-  
0.098119,0.0005995154,0.000119459;0,0,0,1;4.  
0297,0.8030,-4.0297,-0.8030];  
B=[0;-1.90119e-08;0;0.0001278];  
C=[1 0 0 0;0 1 0 0;0 0 1 0;0 0 0 1];  
D=[0;0;0;0];  
H=[0;0;0;0];  
G=[0;0;0;0];
```

```
sys=ss(A,[B G],C,[D H]);
```

```
%REGULATOR
```

```
Q1=0.001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];  
R1=1000;  
K1=lqr(A,B,Q1,R1)
```

```
Q2=0.001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];  
R2=100;  
K2=lqr(A,B,Q2,R2)
```

```
Q3=0.001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];  
R3=10;  
K3=lqr(A,B,Q3,R3)
```

```
Q4=0.001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];  
R4=1;  
K4=lqr(A,B,Q4,R4)
```

```
Q5=0.001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];  
R5=0.1;
```

K5=lqr (A,B,Q5,R5)

Q6=0.001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R6=0.01;

K6=lqr (A,B,Q6,R6)

Q7=0.001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R7=0.001;

K7=lqr (A,B,Q7,R7)

Q8=0.01*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R8=1000;

K8=lqr (A,B,Q8,R8)

Q9=0.01*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R9=100;

K9=lqr (A,B,Q9,R9)

Q10=0.01*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R10=10;

K10=lqr (A,B,Q10,R10)

Q11=0.01*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R11=1;

K11=lqr (A,B,Q11,R11)

Q12=0.01*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R12=0.1;

K12=lqr (A,B,Q12,R12)

Q13=0.01*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R13=0.01;

K13=lqr (A,B,Q13,R13)

Q14=0.01*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R14=0.001;

K14=lqr (A,B,Q14,R14)

Q15=0.1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R15=1000;
K15=lqr(A,B,Q15,R15)

Q16=0.1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R16=100;
K16=lqr(A,B,Q16,R16)

Q17=0.1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R17=10;
K17=lqr(A,B,Q17,R17)

Q18=0.1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R18=1;
K18=lqr(A,B,Q18,R18)

Q19=0.1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R19=0.1;
K19=lqr(A,B,Q19,R19)

Q20=0.1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R20=0.01;
K20=lqr(A,B,Q20,R20)

Q21=0.1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R21=0.001;
K21=lqr(A,B,Q21,R21)

Q22=1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R22=1000;
K22=lqr(A,B,Q22,R22)

Q23=1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R23=100;
K23=lqr(A,B,Q23,R23)

Q24=1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R24=10;

K24=lqr (A,B,Q24,R24)

Q25=1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R25=1;

K25=lqr (A,B,Q25,R25)

Q26=1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R26=0.1;

K26=lqr (A,B,Q26,R26)

Q27=1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R27=0.01;

K27=lqr (A,B,Q27,R27)

Q28=1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R28=0.001;

K28=lqr (A,B,Q28,R28)

Q29=10*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R29=1000;

K29=lqr (A,B,Q29,R29)

Q30=10*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R30=100;

K30=lqr (A,B,Q30,R30)

Q31=10*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R31=10;

K31=lqr (A,B,Q31,R31)

Q32=10*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R32=1;

K32=lqr (A,B,Q32,R32)

Q33=10*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

R33=0.1;

K33=lqr (A,B,Q33,R33)

Q34=10*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R34=0.01;
K34=lqr(A,B,Q34,R34)

Q35=10*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R35=0.001;
K35=lqr(A,B,Q35,R35)

Q36=100*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R36=1000;
K36=lqr(A,B,Q36,R36)

Q37=100*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R37=100;
K37=lqr(A,B,Q37,R37)

Q38=100*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R38=10;
K38=lqr(A,B,Q38,R38)

Q39=100*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R39=1;
K39=lqr(A,B,Q39,R39)

Q40=100*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R40=0.1;
K40=lqr(A,B,Q40,R40)

Q41=100*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R41=0.01;
K41=lqr(A,B,Q41,R41)

Q42=100*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
R42=0.001;
K42=lqr(A,B,Q42,R42)

Q43=0.0001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1]
;

```

R43=1000;
K43=lqr (A,B,Q43,R43) %BISMILLAH

Q44=0.0001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1]
;
R44=100;
K44=lqr (A,B,Q44,R44)

Q45=0.0001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1]
;
R45=10;
K45=lqr (A,B,Q45,R45)

Q46=0.0001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1]
;
R46=1;
K46=lqr (A,B,Q46,R46)

Q47=0.0001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1]
;
R47=0.1;
K47=lqr (A,B,Q47,R47)

Q48=0.0001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1]
;
R48=0.01;
K48=lqr (A,B,Q48,R48)

Q49=0.0001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1]
;
R49=0.001;
K49=lqr (A,B,Q49,R49)

%KALMAN

Qn1=0.001*[1,0;0,1];
Rn1=1000*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest1,L1,P1]=kalman(sys,Qn1,Rn1)

```

```

Qn2=0.001*[1,0;0,1];
Rn2=100*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest2,L2,P2]=kalman(sys,Qn2,Rn2)

Qn3=0.001*[1,0;0,1];
Rn3=10*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest3,L3,P3]=kalman(sys,Qn3,Rn3)

Qn4=0.001*[1,0;0,1];
Rn4=1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest4,L4,P4]=kalman(sys,Qn4,Rn4)

Qn5=0.001*[1,0;0,1];
Rn5=0.1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest5,L5,P5]=kalman(sys,Qn5,Rn5)

Qn6=0.001*[1,0;0,1];
Rn6=0.01*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest6,L6,P6]=kalman(sys,Qn6,Rn6)

Qn7=0.001*[1,0;0,1];
Rn7=0.001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest7,L7,P7]=kalman(sys,Qn7,Rn7)

Qn8=0.01*[1,0;0,1];
Rn8=1000*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest8,L8,P8]=kalman(sys,Qn8,Rn8)

Qn9=0.01*[1,0;0,1];
Rn9=100*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest9,L9,P9]=kalman(sys,Qn9,Rn9)

Qn10=0.01*[1,0;0,1];
Rn10=10*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest10,L10,P10]=kalman(sys,Qn10,Rn10)

Qn11=0.01*[1,0;0,1];

```

```

Rn11=1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest11,L11,P11]=kalman(sys,Qn11,Rn11)

Qn12=0.01*[1,0;0,1];
Rn12=0.1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest12,L12,P12]=kalman(sys,Qn12,Rn12)

Qn13=0.01*[1,0;0,1];
Rn13=0.01*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest13,L13,P13]=kalman(sys,Qn13,Rn13)

Qn14=0.01*[1,0;0,1];
Rn14=0.001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1]
;
[kest14,L14,P14]=kalman(sys,Qn14,Rn14)

Qn15=0.1*[1,0;0,1];
Rn15=1000*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest15,L15,P15]=kalman(sys,Qn15,Rn15)

Qn16=0.1*[1,0;0,1];
Rn16=100*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest16,L16,P16]=kalman(sys,Qn16,Rn16)

Qn17=0.1*[1,0;0,1];
Rn17=10*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest17,L17,P17]=kalman(sys,Qn17,Rn17)

Qn18=0.1*[1,0;0,1];
Rn18=1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest18,L18,P18]=kalman(sys,Qn18,Rn18)

Qn19=0.1*[1,0;0,1];
Rn19=0.1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest19,L19,P19]=kalman(sys,Qn19,Rn19)

Qn20=0.1*[1,0;0,1];
Rn20=0.01*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

```

```

[kest20,L20,P20]=kalman(sys,Qn20,Rn20)

Qn21=0.1*[1,0;0,1];
Rn21=0.001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1]
;
[kest21,L21,P21]=kalman(sys,Qn21,Rn21)

Qn22=1*[1,0;0,1];
Rn22=1000*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest22,L22,P22]=kalman(sys,Qn22,Rn22)

Qn23=1*[1,0;0,1];
Rn23=100*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest23,L23,P23]=kalman(sys,Qn23,Rn23)

Qn24=1*[1,0;0,1];
Rn24=10*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest24,L24,P24]=kalman(sys,Qn24,Rn24)

Qn25=1*[1,0;0,1];
Rn25=1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest25,L25,P25]=kalman(sys,Qn25,Rn25)

Qn26=1*[1,0;0,1];
Rn26=0.1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest26,L26,P26]=kalman(sys,Qn26,Rn26)

Qn27=1*[1,0;0,1];
Rn27=0.01*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest27,L27,P27]=kalman(sys,Qn27,Rn27)

Qn28=1*[1,0;0,1];
Rn28=0.001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1]
;
[kest28,L28,P28]=kalman(sys,Qn28,Rn28)

Qn29=10*[1,0;0,1];
Rn29=1000*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];

```

```
[kest29,L29,P29]=kalman(sys,Qn29,Rn29)
```

```
Qn30=10*[1,0;0,1];
```

```
Rn30=100*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
```

```
[kest30,L30,P30]=kalman(sys,Qn30,Rn30)
```

```
Qn31=10*[1,0;0,1];
```

```
Rn31=10*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
```

```
[kest31,L31,P31]=kalman(sys,Qn31,Rn31)
```

```
Qn32=10*[1,0;0,1];
```

```
Rn32=1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
```

```
[kest32,L32,P32]=kalman(sys,Qn32,Rn32)
```

```
Qn33=10*[1,0;0,1];
```

```
Rn33=0.1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
```

```
[kest33,L33,P33]=kalman(sys,Qn33,Rn33)
```

```
Qn34=10*[1,0;0,1];
```

```
Rn34=0.01*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
```

```
[kest34,L34,P34]=kalman(sys,Qn34,Rn34)
```

```
Qn35=10*[1,0;0,1];
```

```
Rn35=0.001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1]
```

```
;
```

```
[kest35,L35,P35]=kalman(sys,Qn35,Rn35)
```

```
Qn36=100*[1,0;0,1];
```

```
Rn36=1000*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
```

```
[kest36,L36,P36]=kalman(sys,Qn36,Rn36)
```

```
Qn37=100*[1,0;0,1];
```

```
Rn37=100*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
```

```
[kest37,L37,P37]=kalman(sys,Qn37,Rn37)
```

```
Qn38=100*[1,0;0,1];
```

```
Rn38=10*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
```

```
[kest38,L38,P38]=kalman(sys,Qn38,Rn38)
```

```

Qn39=100*[1,0;0,1];
Rn39=1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest39,L39,P39]=kalman(sys,Qn39,Rn39)

Qn40=100*[1,0;0,1];
Rn40=0.1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest40,L40,P40]=kalman(sys,Qn40,Rn40)

Qn41=100*[1,0;0,1];
Rn41=0.01*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest41,L41,P41]=kalman(sys,Qn41,Rn41)

Qn42=100*[1,0;0,1];
Rn42=0.001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1]
;
[kest42,L42,P42]=kalman(sys,Qn42,Rn42)

Qn43=0.0001*[1,0;0,1];
Rn43=1000*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest43,L43,P43]=kalman(sys,Qn43,Rn43)

Qn44=0.0001*[1,0;0,1];
Rn44=100*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest44,L44,P44]=kalman(sys,Qn44,Rn44)

Qn45=0.0001*[1,0;0,1];
Rn45=10*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest45,L45,P45]=kalman(sys,Qn45,Rn45)

Qn46=0.0001*[1,0;0,1];
Rn46=1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest46,L46,P46]=kalman(sys,Qn46,Rn46)

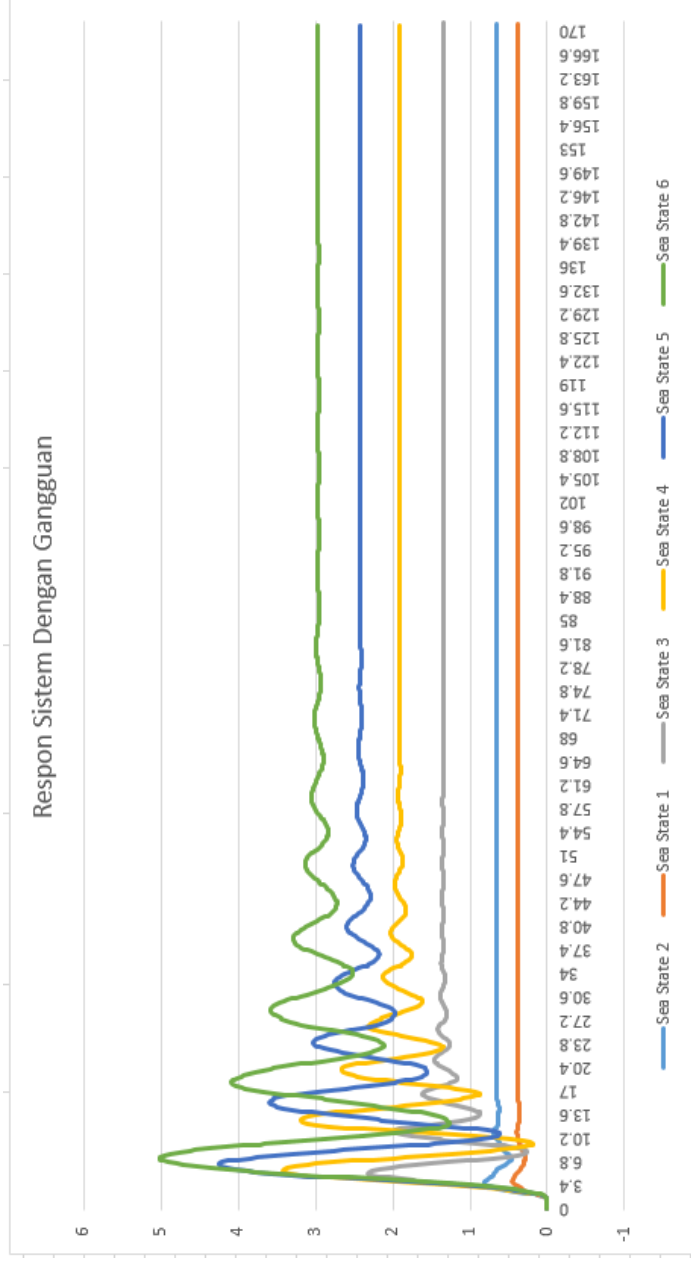
Qn47=0.0001*[1,0;0,1];
Rn47=0.1*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
[kest47,L47,P47]=kalman(sys,Qn47,Rn47)

```

```
Qn48=0.0001*[1,0;0,1];  
Rn48=0.01*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];  
[kest48,L48,P48]=kalman(sys,Qn48,Rn48)
```

```
Qn49=0.0001*[1,0;0,1];  
Rn49=0.001*[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;0,0,0,1]  
;  
[kest49,L49,P49]=kalman(sys,Qn49,Rn49) %BISMI  
LLAH
```

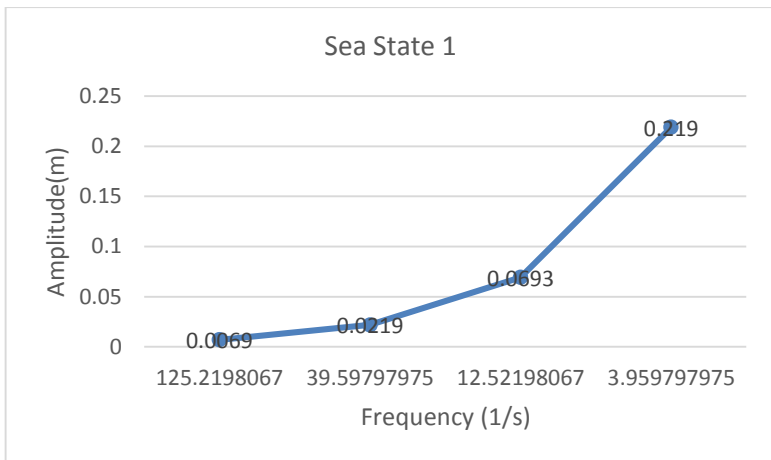

Respon Sistem Dengan Gangguan



Grafik respon dengan gangguan sea state 1 sampai 6

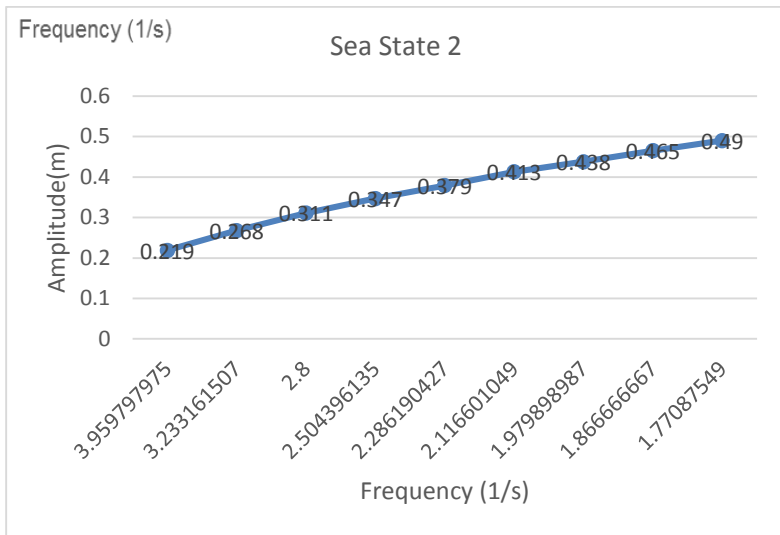
Response Amplitude Operator (RAO) Gelombang

Sea state 1					
tinggi	w0	w0^2	2*cacing*w0	Kw	A
0.0001	125.2198067	15680	25.04396135	62.86034298	0.0069
0.001	39.59797975	1568	7.919595949	19.87818583	0.0219
0.01	12.52198067	156.8	2.504396135	6.286034298	0.0693
0.1	3.959797975	15.68	0.791959595	1.987818583	0.219



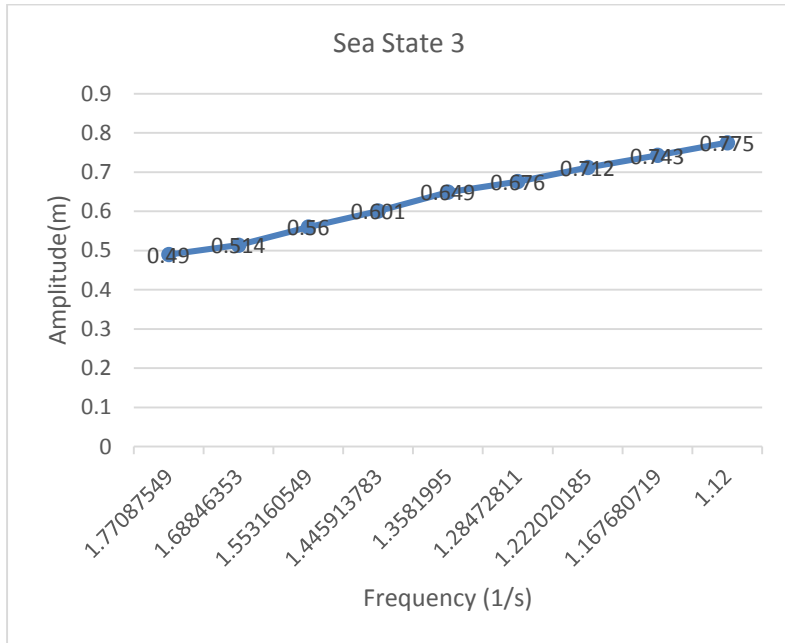
Sea State 2					
tinggi	w0	w0^2	2*cacing*w0	Kw	A
0.1	3.959797975	15.68	0.791959595	1.987818583	0.219
0.15	3.233161507	10.45	0.646632301	1.623047077	0.268
0.2	2.8	7.84	0.56	1.4056	0.311
0.25	2.504396135	6.272	0.500879227	1.25720686	0.347
0.3	2.286190427	5.2267	0.457238085	1.147667594	0.379

tinggi	w0	w0^2	2*cacing*w0	Kw	A
0.35	2.116601049	4.48	0.42332021	1.062533727	0.413
0.4	1.979898987	3.92	0.395979797	0.993909292	0.438
0.45	1.866666667	3.484	0.373333333	0.937066667	0.465
0.5	1.77087549	3.136	0.354175098	0.888979496	0.49



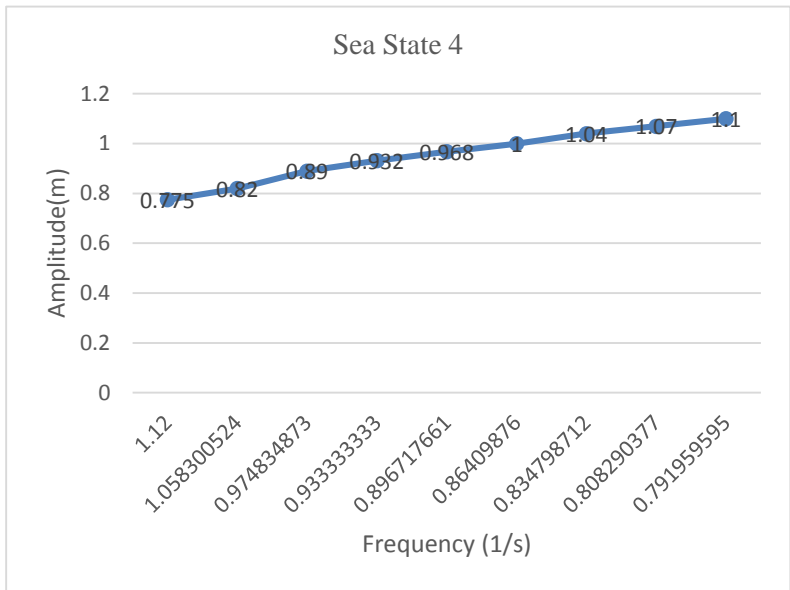
Sea State 3					
tinggi	w0	w0^2	2*cacing*w0	Kw	A
0.5	1.77087549	3.136	0.354175098	0.888979496	0.49
0.55	1.68846353	2.8509	0.337692706	0.847608692	0.514
0.65	1.553160549	2.4123	0.31063211	0.779686596	0.56
0.75	1.445913783	2.0907	0.289182757	0.725848719	0.601
0.85	1.3581995	1.8447	0.2716399	0.681816149	0.649
0.95	1.28472811	1.6505	0.256945622	0.644933511	0.676

tinggi	w0	w0^2	2*cacing*w0	Kw	A
1.05	1.222020185	1.4933	0.244404037	0.613454133	0.712
1.15	1.167680719	1.3635	0.233536144	0.586175721	0.743
1.25	1.12	1.2544	0.224	0.56224	0.775



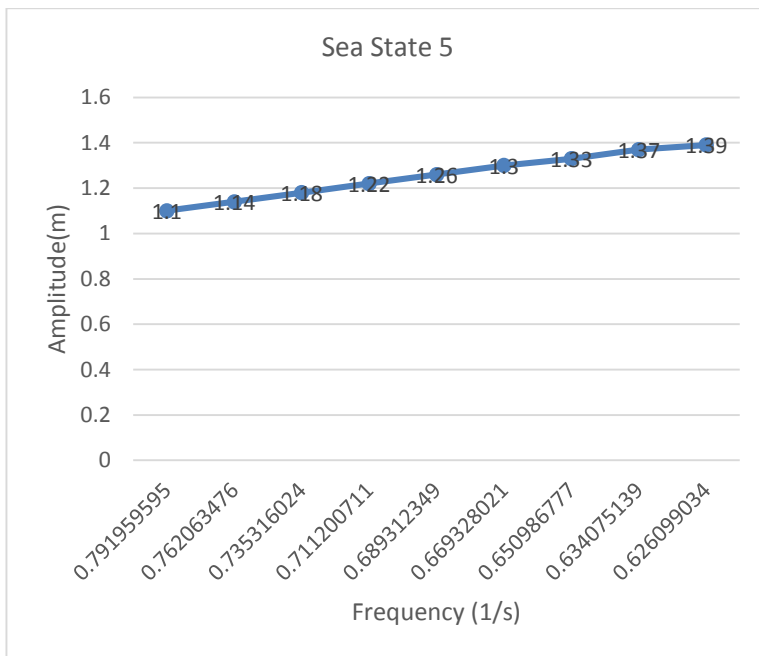
Sea State 4					
tinggi	w0	w0^2	2*cacing*w0	Kw	A
1.25	1.12	1.2544	0.224	0.56224	0.775
1.4	1.058300524	1.12	0.211660105	0.531266863	0.82
1.65	0.974834873	0.9503	0.194966975	0.489367106	0.89
1.8	0.933333333	0.8711	0.186666667	0.468533333	0.932
1.95	0.896717661	0.8041	0.179343532	0.450152266	0.968

tinggi	w0	w0^2	2*cacing*w0	Kw	A
2.1	0.86409876	0.7467	0.172819752	0.433777577	1
2.25	0.834798712	0.6969	0.166959742	0.419068953	1.04
2.4	0.808290377	0.6533	0.161658075	0.405761769	1.07
2.5	0.791959595	0.6272	0.158391919	0.397563717	1.1



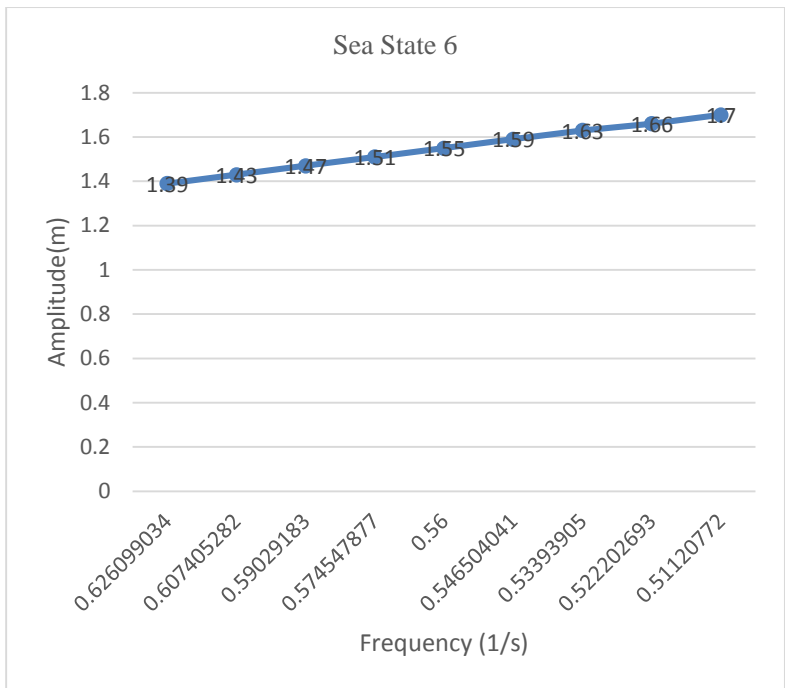
Sea State 5					
tinggi	w0	w0^2	2*cacing*w0	Kw	A
2.5	0.791959595	0.6272	0.158391919	0.397563717	1.1
2.7	0.762063476	0.5807	0.152412695	0.382555865	1.14
2.9	0.735316024	0.5406	0.147063205	0.369128644	1.18
3.1	0.711200711	0.5058	0.142240142	0.357022757	1.22

tinggi	w0	w0^2	2*cacing*w0	Kw	A
3.3	0.689312349	0.4752	0.13786247	0.346034799	1.26
3.5	0.669328021	0.448	0.133865604	0.336002667	1.3
3.7	0.650986777	0.4237	0.130197355	0.326795362	1.33
3.9	0.634075139	0.4021	0.126815028	0.31830572	1.37
4	0.626099034	0.392	0.125219807	0.314301715	1.39



Sea State 6					
tinggi	w0	w0^2	2*cacing*w0	Kw	A
4	0.626099034	0.392	0.125219807	0.314301715	1.39
4.25	0.607405282	0.3689	0.121481056	0.304917452	1.43
4.5	0.59029183	0.3484	0.118058366	0.296326499	1.47

tinggi	w0	w0^2	2*cacing*w0	Kw	A
4.75	0.574547877	0.3301	0.114909575	0.288423034	1.51
5	0.56	0.3136	0.112	0.28112	1.55
5.25	0.546504041	0.2987	0.109300808	0.274345029	1.59
5.5	0.53393905	0.2851	0.10678781	0.268037403	1.63
5.75	0.522202693	0.2727	0.104440539	0.262145752	1.66
6	0.51120772	0.2613	0.102241544	0.256626276	1.7



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Alfian Harida Maulana yang akrab disapa Alfian. Penulis merupakan anak pertama, terlahir di kota Madiun pada tanggal 25 Agustus 1995 Penulis menempuh pendidikan di SDN Unggulan Jetis 3 Lamongan lulus tahun 2005, SMPN 1 Lamongan lulus tahun 2011, dan SMAN 2 Lamongan lulus tahun 2014. Pendidikan sarjana ditempuh di Jurusan Teknik Fisika ITS melalui jalur SNMPTN 2014. Selama aktif menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam organisasi kemahasiswaan Klub Keilmiaan ITS selama periode 2015-2016 sebagai Staff, UKM Fotografi ITS ITS selama periode 2015-2016 sebagai Staff, dan BEM FTI-ITS selama periode 2015-2016 sebagai Staff & 2016-2017 sebagai Kepala Departemen Kewirausahaan. Selain aktif dalam berorganisasi, penulis juga aktif dalam kegiatan kependamuan yaitu Pemandu LKMW dan Trainer Keilmiahan ITS. Pengalaman *internship program* selama 1 bulan di PT. Pertamina RU III Plaju, Palembang, Sumatera Selatan. Bidang minat penulis dalam mengerjakan tugas akhir adalah instrumentasi. Penulis dapat dihubungi di email alfian.harida.maulana@gmail.com.